

Einfluss von Lichtspektren auf wertgebende Inhaltsstoffe und
Qualität asiatischer Gemüsepflanzen,
am Beispiel von *Persicaria odorata* (Lour.) Soják

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
doctor rerum agriculturarum
(Dr. rer. agr.)

eingereicht an der
Lebenswissenschaftlichen Fakultät
der Humboldt-Universität zu Berlin

von
MSc Kerstin Paschko

Präsidentin der
Humboldt-Universität zu Berlin
Prof. Dr.-Ing. Dr. Sabine Kunst

Dekan der Lebenswissenschaftlichen Fakultät
Prof. Dr. Bernhard Grimm

Gutachter/in:

1. Prof. Dr. sc. Dr. h.c. mult. Michael Böhme
2. Prof. Dr. Robert Kabbert
3. Prof. Dr. Susanne Huyskens-Keil

Tag der mündlichen Prüfung: 08.09.2020

DANKSAGUNG

Ich möchte mich herzlich bedanken bei Herrn Prof. Dr. sc. Dr. h.c. mult. Böhme für die Möglichkeit der Dissertation über dieses interessante und weitgreifende Thema. Gespräche mit ihm und sein großes fachliches Wissen haben mir sehr bei der Fertigstellung der Arbeit geholfen.

Wichtig war zudem die Übernahme der Zweitbetreuung und Begutachtung durch Herrn Prof. Dr. Kabbert, der nicht nur während der Dissertation eine wichtige Rolle gespielt hat, sondern mich bereits im Studium sehr gut darauf vorbereitet hat. Ich bin dankbar für die Korrekturen, wodurch ich einzelne Sachverhalte neu überdenken konnte und die Arbeit dadurch stetig verbessert wurde.

Aus vollem Herzen möchte ich mich bei Frau Dr. Pinker bedanken, die meine Arbeit über die ganzen Jahre sehr eng betreut, mich motiviert und angeleitet hat. Ohne sie wäre die Arbeit zu keinem Ende gekommen.

Ein großer Dank geht an meine Freundin und ehemalige Kollegin Nikolina Grabovac für ihre große Hilfe bei der Versuchsdurchführung und großes Verständnis während meiner Elternzeiten. Auch danke ich allen Mitarbeiter/innen des Fachgebietes Gärtnerische Pflanzensysteme für das angenehme und anregende Arbeitsumfeld und Unterstützung.

Die Promotion wurde ermöglicht durch meine Anstellung als wissenschaftliche Mitarbeiterin im Rahmen eines ZIM-Projektes, dass durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie gefördert wurde. Deswegen möchte ich mich bei den Geldgebern bedanken und abermals bei Herrn Böhme und Frau Pinker für die Möglichkeit der Mitarbeit an dem Projekt.

Weiterhin möchte ich mich bei der Beuth Hochschule für Technik für das Promotionsstipendium bedanken, durch das es mir möglich war, mich voll und ganz auf die Arbeit an der Dissertation zu konzentrieren.

Ein weiterer Dank geht an meine Freunde und Familie, die mir während der Zeit mit einem offenen Ohr, der Bereitstellung eines Arbeitsplatzes für Wochenendarbeiten, der Betreuung meiner Kinder oder motivierenden Worten weitergeholfen haben. Ein besonderer Dank geht an meinen Ehemann und meine beiden Kinder.

ABSTRACT

Consumers' growing interest in the origin, freshness and quality of food increase demand for locally produced products. In the future, the importance of a local and resource efficient cultivation methods for fruit and vegetables could rise to counter predicted declines in supply due to climate change or other crises. As latitude increases, lower levels of irradiation limits seasonal cultivation. Artificial lighting is costly and requires additional resources that negatively can impact the environment. For an energy-efficient use of lighting systems a better knowledge is required considering the influence of light intensity and spectral composition on the accumulation of biomass and nutrients.

Emerged from the AiF-project „Energy efficient greenhouse by nanoactive film,” this thesis examined how light conditions affect the nutritive quality of the test plant *Persicaria odorata*. Experiments took place in a greenhouse (sunlight) and climate chamber (fluorescent tube) and under consideration of a wide range of nutritive compounds, several test series, different light modifications and the use of various statistically evaluation procedures. This thesis demonstrates that varying light conditions increase nutritive value and yield under realistic conditions. The day light integral greatly impacted plant growth. Without modifying spectral composition, increasing the day light integral by 1% improved the fresh mass of 0,96% in the greenhouse and 0,64% in the climate chamber. Experiments with monochromatic LEDs proved a high increase of biomass by spectral range dependent enhancements of the day light integral. For example, in the greenhouse, fresh mass was mostly affected by short wave blue radiation (443 nm) (+13% by the increase of day light integral of 1% by the supplementation with blue LEDs). Additionally, the day light integral influenced the accumulation of nutrients. Higher contents of polyphenols and flavonoids in the climate chamber and the reactions on additional monochromatic LEDs proved again that it is more effective to increase day light integral by a specific enhancement of certain spectral ranges. The highest increases were achieved by supplementing spectral ranges that are not included in the emission spectrum of commonly used high pressure sodium lamps. Results also indicate that controlled agriculture's frequently used lighting systems which emit blue and red light can improve plant growth, but it is not optimal regarding the nutritive quality of plants. Adding short wave green light (515 nm) could increase biomass and improve the nutritive quality considerably.

This study's research demonstrates that additional lighting in horticulture should be carefully planned but it is an effective method to improve yield and nutritive quality of herbal vegetables in light deprived northern regions during months that experience low irradiation. By altering the emission spectrum of traditional artificial lighting systems, it is indeed possible to increase yield and simultaneously improve the nutritive value of vegetables and thus guarantee improved supplies with essential and health-promoting nutrients.

Keywords: *P. odorata*, nutritive value, lighting systems, LEDs, spectral light composition

KURZFASSUNG

Durch ein steigendes Interesse der Verbraucher an Herkunft, Frische und Qualität von Lebensmitteln erhöht sich die Nachfrage nach regional produzierten pflanzlichen Erzeugnissen. Die Bedeutung eines regionalen, möglichst ressourcenschonenden Anbaus von Obst und Gemüse könnte in Zukunft noch steigen, um bei einer prognostizierten Verschlechterung der Versorgungslage mit pflanzlichen Erzeugnissen durch den erwarteten Klimawandel oder während Krisenzeiten den Bedarf zu decken und die ohnehin schon nicht ausreichende Aufnahme von essentiellen bzw. gesundheitsfördernden pflanzlichen Inhaltsstoffen zu verbessern. Mit zunehmender geographischer Breite wird jedoch das Licht zu einem saisonal limitierenden Faktor für einen regionalen Anbau. Eine Zusatzbeleuchtung wird essentiell, bedeutet aber auch weitere Kosten und das Nutzen von Ressourcen. Um den Einsatz von Beleuchtungssystemen möglichst energieeffizient zu gestalten, ist ein besseres Verständnis im Hinblick auf den Einfluss von Lichtintensität und der spektralen Lichtzusammensetzung auf die Akkumulierung von Biomasse und Nährwert erforderlich.

Aus diesem Grund war das Ziel der vorliegenden Arbeit, den Zusammenhang zwischen der nutritiven Qualität der Versuchspflanze *Persicaria odorata* und den Lichtbedingungen darzustellen. Als Teil des, von der AiF Projekt GmbH geförderten Projektes „Energieeffizientes Gewächshaus durch lichtaktive Nanofolie“ wurden Versuche in einem Gewächshaus (Sonnenlicht) und Klimakammern (Dreiband-Leuchtstoffröhren) durchgeführt. Unter Berücksichtigung eines breiten Inhaltsstoffspektrums, mehreren Versuchsreihen, Lichtmodifizierungen anhand von Zusatzbestrahlungen mit LEDs und Überdeckungen mit photoselektiven Folien sowie dem Anwenden verschiedener statistischer Auswertungsverfahren wurden neue Aspekte im Hinblick auf die Beeinflussung von Nährwert und Ertrag durch das Licht unter praxisnahen Bedingungen gewonnen. Die Tageslichtsumme beeinflusste das Pflanzenwachstum positiv. Zum Beispiel wurde die Frischmasse bei einem Anstieg der Tageslichtsumme um 1% mit gleichbleibender spektralen Lichtzusammensetzung um 0,96% im Gewächshaus bzw. 0,64% in der Klimakammer erhöht. Die höheren Erträge in der Klimakammer bei deutlich geringerer Tageslichtsumme und Unterschiede zwischen den Versuchsreihen im Gewächshaus deuten jedoch einen Einfluss weiterer Faktoren an. Die Versuche mit monochromatischen LEDs zeigten, dass spektralbereichsabhängige Erhöhungen der Tageslichtsumme die Biomassesteigerungen verstärkten. Den deutlichsten Effekt im Hinblick auf die Frischmassebildung hatte das kurzwellige Blaulicht (443 nm) mit einer durchschnittlichen Frischmassesteigerung von 13% im Gewächshaus (bei Erhöhung der Tageslichtsumme um 1% durch Supplementierung mit blauen LEDs). Weiterhin wurde auch die Inhaltsstoffakkumulation durch die Tageslichtsumme beeinflusst. Jedoch zeigte die Steigerung bestimmter Spektralbereiche insgesamt eine stärkere Wirkung. Insbesondere das kurzwellige Grünlicht (515 nm) bewirkte eine Erhöhung des Nährwertes. Dieser Spektralbereich wird jedoch durch die traditionell in Gewächshäusern eingesetzten Natriumhochdrucklampen kaum emittiert. Auch sind die bisher häufig eingesetzten Bestrahlungen mit Blau-

und Rotlicht in kontrollierten Anbausystemen zwar wichtig für den Aufbau von Biomasse, jedoch nicht optimal im Hinblick auf den Nährwert.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Belichtung im Gartenbau sorgfältig ausgewählt werden sollte, jedoch während strahlungsschwachen Monaten eine effektive Möglichkeit ist, den Ertrag und die nutritive Qualität von *P. odorata* deutlich erhöhten. Durch Modifikationen der Lichtbedingungen ist es möglich den Ertrag und Nährwert pflanzlicher Erzeugnisse zu steigern und dadurch die Versorgungslage mit gesundheitsfördernden bzw. essentiellen pflanzlichen Inhaltsstoffen zu verbessern.

Schlüsselwörter: *P. odorata*, Nährwert, Beleuchtungssysteme, LEDs, spektrale Lichtzusammensetzung

Abkürzungsverzeichnis und Begriffserklärungen

A0	spezialisierte Chlorophylle
A1	Phylloquinon
ABTS	2,2'-Azino-di(3-ethylbenzthiazolin-6-sulfonsäure)
AMR1	ASCORBIC ACID MANNOSE PATHWAY REGULATOR 1
AscH₂ /Asc_{ox}	Ascorbinsäure (AscH ₂ : reduzierte Form; Asc _{ox} : oxidierte Form)
ATP	Adenosintriphosphat
B	blauer Spektralbereich (401-500 nm)
B:FR	Verhältnis Blau:Fernrot
B:G	Verhältnis Blau:Grün
B:R	Verhältnis Blau:Rot
BR:G	Verhältnis Blau und Rot:Grün
bZIP	basic leucine zipper
CDD	COP10, DDB1a, DET1
Chl	Chlorophyll
CO	CONSTANS
COP	CONSTITUTIVE PHOTOMORPHOGENIC
CRL	Cullin-RING Ubiquitinligasen
Cry	Cryptochrome
CSN	COP9 Signalosom
CYT	Cytochrome
D-A-CH-Organisation	Zusammenschluss der Fachgesellschaften für Ernährung der Länder Deutschland (D), Österreich (A) und Schweiz (CH)
DET	DE-ETIOLATED
DMAPP	Demethylallyldiphosphat
EC	Electric conductivity (Maß für die Konzentration der gelösten Salze in einer Lösung)
EFSA	European Food Safety Authority (Europäische Behörde für Lebensmittelsicherheit)
ELF3	EARLY FLOWERING3
FAD (H⁺)	Flavin-Adenin-Dinukleotid (Semiquinon)
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
Fd	Ferredoxin
FeS	Eisen-Schwefel-Proteine
FHL	FHY-1 LIKE
FHY1	FAR-RED ELONGATED HYPOCOTYL 1
FKF1	Flavin-binding Kelch repeat F-box1
FL	Fluoreszenzlampe

Fm	maximale Fluoreszenzausbeute
FMN	Flavin Mononukleotid
Fo	Ursprungsfluoreszenz
FT	FLOWERING LOCUS T
FUS	FUSCA
Fv	variable Fluoreszenz als Differenz zwischen Fm und Fo
G	grüner Spektralbereich (501-600 nm)
GAE	Gallic acid equivalents
GBF1	G-BOX-BINDING FACTOR 1
GDP	Guanosindiphosphat
GGP	GDP-L-Galaktosephosphorylase
GGPP	Geranylgeranyldiphosphat
GI	GIGANTEA
GME	GDP-Mannoseepimerase
GSH	Glutathion
GSSG	Glutathion Disulfid
GwH	Gewächshaus
H₂O₂	Wasserstoffperoxid
HFR1	LONG HYPOCOTYL IN FAR-RED 1
HIR	High irradiation response
HMG	Half Minus Green (Folienbezeichnung)
HY5	ELONGATED HYPOCOTYL5
OH·	Hydroxyradikal
HYH	HY5 HOMOLOG
IPP	Isopentenylidiphosphat
KK	Klimakammer
LAF1	LONG AFTER FAR-RED LIGHT 1
LED	Light-emitting diodes
LFR	Low fluence response
LKP2	LOV Kelch Protein 2
lx	SI-Einheit der Beleuchtungsstärke (lux); 1 lx= 1 Lumen/ m ²
LOV	Light, oxygen or voltage
MEP	2-C-Methyl-D-Erythritol 4-Phosphat
mS	Millisiemens
NL	Natürliches Licht
NO·	Stickstoffmonoxid
ONOO·	Peroxynitrit
PAL	Phenylalaninlyase
PAP	PRODUCTION OF ANTHOCYANIN PIGMENT

PAR	Photosynthetic active radiation
PC	Plastocyanin
Phe	Phäophytin
Phot	Phototropine
PSY	Phytoenesynthase
PIF	PHYTOCHROME INTERACTING FACTORS
PL	Pale Lavander (Folienbezeichnung)
PP7	SERIN/THREONIN-PROTEIN PHOSPHATASE 7
Pr, Pfr	Phytochrome (aktiv bzw. Inaktiv)
PSI, II	Photosystem I, II
QA	Plastoquinon A
QB	Plastoquinon B
QE	Quercetin Equivalents
R	roter Spektralbereich (601-700 nm)
R:FR	Verhältnis Rot:Fernrot (660:730 nm)
R:G	Verhältnis Rot:Grün
RE	Retinol equivalents
ROS	reactive oxygen species (Reaktive Sauerstoffspezies)
SPA	SUPPRESSOR OF PHYTOCHROME A
TAL	Tyrosinammoniumlyase
TG	Trockengewicht
TLS	Tageslichtsumme
TM	Trockenmasse
TM%	Trockenmassegehalt
UV	Ultraviolette Strahlung
UVR8	UV-Rezeptor 8
VLF	very low response
WHO	World Health Organization
ZTL	Zeitlupe

INHALTSVERZEICHNIS

1. EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG	1
2. HINTERGRUND UND STAND DES WISSENS.....	3
2.1 Lichtintensität und Lichtspektren	3
2.1.1 Sonnenlicht und Witterungseinflüsse.....	4
2.1.2 Modifikationen von Lichtintensität und –spektren im Gartenbau.....	11
2.1.2.1 Einsatz zusätzlicher Lichtquellen	11
2.1.2.2 Einsatz von Netzen und Folien.....	14
2.2 Lichtnutzung durch die Pflanzen.....	16
2.2.1 Photosynthetische Energiegewinnung.....	17
2.2.2 Lichtabhängige Entwicklungsprozesse: Photorezeptoren und Signalkaskaden	20
2.2.2.1 Photorezeptoren.....	21
2.2.2.2 Nachgeschaltete Regulatoren und Transkriptionsfaktoren.....	24
2.2.3 Beeinflussung der Pflanzenentwicklung durch Lichtintensitäten und –spektren	31
2.3 Wertgebende Inhaltsstoffe und deren Beeinflussung durch das Licht	36
2.3.1 Oxidativer Stress in Pflanzen	36
2.3.2 Antioxidantien	39
2.3.2.1 Ascorbinsäure: Synthese, Funktion und Einflussfaktoren.....	39
2.3.2.2 Carotinoide: Synthese, Funktion und Einflussfaktoren.....	44
2.3.2.3 Polyphenole: Synthese, Funktion und Einflussfaktoren.....	47
2.3.3 Ausgewählte Mineralstoffe: Aufnahme und Funktionen	52
2.3.3.1 Aufnahme	52
2.3.3.2 Funktionen der untersuchten Mineralstoffe.....	54
2.4 Bedeutung der Inhaltsstoffe für die menschliche Ernährung	62
2.4.1 Oxidativer Stress beim Menschen	62
2.4.2 Funktionen der Inhaltsstoffe im Körper und Aufnahmeempfehlungen.....	65
2.4.2.1 Ascorbinsäure.....	65
2.4.2.2 Carotinoide	67
2.4.2.3 Polyphenole	71
2.4.2.4 Mineralstoffe	73
2.5 <i>Persicaria odorata</i> Soják, syn. <i>Polygonum odoratum</i>	81
2.5.1 Botanische Beschreibung und Kultivierung.....	81
2.5.2 Verwendung und Bedeutung für die Ernährung.....	82
3. ZIELSTELLUNG UND AUFGABEN	85
3.1 Ziele.....	85
3.2 Aufgaben	86
3.3 Hypothesen.....	87
4. MATERIAL UND METHODEN	88
4.1 Pflanzenmaterialien.....	91
4.2 Weitere Versuchsmaterialien.....	92
4.3 Versuchsaufbau	92
4.3.1 Versuchsbedingungen in Klimakammern	93
4.3.2 Versuchsbedingungen im Gewächshaus	95
4.3.3 Versuche mit zusätzlicher LED-Beleuchtung	101

4.3.4 Lichtmodifizierung durch Überdeckung mit Folien	104
4.4 Methoden zur Ermittlung ausgewählter Inhaltsstoffe	108
4.4.1 Messung des Ascorbinsäuregehalts	108
4.4.2 Messung des Carotinoid- und Chlorophyllgehaltes	109
4.4.3 Messung der polyphenolische Inhaltsstoffe	109
4.4.4 Bestimmung anorganischer Inhaltsstoffe	111
4.5 Weitere Bestimmungen	111
4.5.1 Lichtmessungen	112
4.5.2 Chlorophyllfluoreszenz	113
4.5.3 Messungen Temperatur und Luftfeuchtigkeit	113
4.5.4 Parameter zur Charakterisierung des Wachstums	114
4.6 Ergebnisdarstellung und Statistik	114
5. ERGEBNISSE UND DISKUSSION	119
5.1 Beeinflussung wertgebender Inhaltsstoffe durch das Licht	119
5.1.1 Ascorbinsäure	119
5.1.2 Carotinoide	127
5.1.3 Polyphenole	134
5.1.4 Antioxidative Kapazität	144
5.1.5 Flavonoide	153
5.1.6 Anthocyane	160
5.1.7 Mineralstoffe	165
5.2 Beeinflussung der Wachstumsparameter durch das Licht	194
5.2.1 Triebwachstum	194
5.2.2 Biomasseakkumulierung	202
5.2.2.1 Biomasseakkumulierung in der Klimakammer	203
5.2.2.2 Biomasseakkumulierung im Gewächshaus	207
5.2.2.3 Diskussion der Biomasseakkumulierung	214
6. GENERELLE DISKUSSION	222
7. ZUSAMMENFASSUNG & SCHLUSSFOLGERUNGEN	230
8. EMPFEHLUNGEN FÜR WEITERE FORSCHUNGEN	235
9. LITERATURVERZEICHNIS	i
10. ABBILDUNGSVERZEICHNIS	cxv
11. TABELLENVERZEICHNIS	cxxiv
12. ANHANG	cxxx
Anhang 1.: Chlorophyllfluoreszenzmessungen	cxxx
Anhang 2.: Chlorophyll a und b Gehalte	cxxx
Anhang 3: Messungen UV-Strahlung	cxxxiv
Anhang 4: Verbrauch an Nährlösung	cxxxv
Anhang 5: Korrelationen	cxxxvi
Anhang 6: Partielle Korrelationen für Wachstumsparameter	cxxxviii
Anhang 7: Hauptkomponentenanalysen	cxli
Anhang 8: Erreichte Nährwertveränderungen durch Lichtmodifikationen	cxlv

1. EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG

Defizite an Vitaminen und Mineralstoffen (Mikronährstoffe) werden assoziiert mit einer höheren Anfälligkeit für Krankheiten durch eine Schwächung der immun- und nicht-immunbedingten Abwehr (BHASKARAM, 2002; MARCOS et al., 2003). Auch längerfristige Folgen durch epigenetische Veränderungen, beruhend auf Methylierungen der DNA und resultierend in einer gestörten Aufmerksamkeit und verringerten kognitiven Fähigkeiten, werden mit einer Mangelernährung assoziiert (PETER et al., 2016). Der Verzehr von Obst und Gemüse wird hingegen mit einer allgemein verbesserten Gesundheit und einem reduzierten Risiko u.a. an Herz-Kreislaufkrankungen und Krebs zu sterben, in Verbindung gebracht (DAUCHET et al., 2005; HE et al., 2007; OYEBODE et al., 2014; SLAVIN und LLOYD, 2012; WANG et al., 2014).

Allgemein sollte anzunehmen sein, dass in Ländern mit hohem Einkommen eine ausreichende, jahreszeitenunabhängige Versorgung mit Mikronährstoffen durch den globalen Handel mit Obst und Gemüse gewährleistet wird. Jedoch werden trotz der aktuell guten Versorgungslage mit einer breiten Diversität an frischem Obst und Gemüse die Aufnahmeempfehlungen für viele Vitamine und Mineralstoffe nicht von der gesamten deutschen Bevölkerung erreicht. Unter anderem zeigen Ernährungserhebungen, dass ein Drittel der Deutschen nicht ausreichend Vitamin C aufnimmt (FREYE, 2018) und im Mittel die Aufnahmeempfehlungen für Kalium, Calcium und Eisen nicht erreicht werden (KREMS et al., 2013). Veränderungen der Verfügbarkeit und Preise von Obst und Gemüse können in Zukunft in Deutschland den Mangel an pflanzenspezifischen, essentiellen oder gesundheitsfördernden Nährstoffen manifestieren. Ein großes Risiko geht diesbezüglich vom Klimawandel aus, durch den aufgrund von veränderten Temperaturen und Niederschlägen Reduktionen der globalen landwirtschaftlichen Produktivität erwartet werden (MÜLLER und ROBERTSON, 2014; NELSON et al., 2014; ROSENZWEIG et al., 2014). Die geringere Verfügbarkeit von Obst und Gemüse resultiert in einer reduzierten Aufnahme an Vitaminen (MIELGO-AYUSO et al., 2017) und führt zu einer negativen Beeinflussung der Gesundheit (SPRINGMANN et al., 2016). Für einen Zeitraum bis 2050 wird eine Reduktion des Obst- und Gemüsekonsums um 4,0 % prognostiziert. Dadurch wird mit einem Anstieg an Krankheiten gerechnet, die auf einen Mangel an Vitaminen, Mineralstoffen und anderen pflanzlichen Inhaltsstoffen zurückgeführt werden. Dadurch wird für das Jahr 2050 von zusätzlichen 534.000 Todesfällen weltweit ausgegangen, die auf einen geringeren Obst- und Gemüsekonsum als Resultat der klimabedingt verringerten landwirtschaftlichen Produktivität. Insbesondere in Ländern mit hohem Einkommen würde ein reduzierter Obst- und Gemüseverzehr den Hauptrisikofaktor für klimabedingte Todesfälle darstellen. Klimaextreme, Veränderungen des Nährwertes von Lebensmitteln und direkter Hitze- und Wasserstress wurden nicht berücksichtigt und würden die negativen Auswirkungen des Klimawandels auf die menschliche Gesundheit verstärken (SPRINGMANN et al., 2016).

Entsprechend stellt sich die Frage, wie in Zukunft die Versorgung der Menschen mit Lebensmitteln, speziell Obst und Gemüse, gewährleistet werden kann. Eine globale Antwort kann aufgrund regionaler Unterschiede nicht gefunden werden. Um durch einen vermehrten regionalen Anbau von Obst und Gemüse eine gewisse Unabhängigkeit von Lebensmittelimporten zu erreichen, ist für eine ganzjährige Versorgung eine Steigerung der Produktion unter geschützten Bedingungen erforderlich, da ein Freilandanbau von gartenbaulichen Erzeugnissen nur saisonal möglich ist. Zugleich sollte der Anbau unter möglichst ressourcensparenden Bedingungen stattfinden, um nicht unnötig die Klimaproblematik zu verstärken.

Mit zunehmender geographischer Breite wird das Licht jedoch zu einem limitierenden Faktor für den Aufbau von Biomasse. Zudem dient das Licht als Signal für photomorphogenetische Prozesse, die auch die Synthese von Inhaltsstoffen beeinflussen. Folglich sind Zusatzbelichtungen im Gewächshaus essentiell für einen Anbau von Gartenbauerzeugnissen während der strahlungsschwachen Monate, bedeuten aber zusätzliche Kosten und die Verwendung von Ressourcen. Um den Einsatz von Licht möglichst effizient zu gestalten, sind genaue Kenntnisse im Hinblick auf den Nutzen einzelner Spektralbereiche für die Biomassebildung und die Akkumulation von Inhaltsstoffen erforderlich. Daraus ergibt sich das Ziel dieser Arbeit, die Beeinflussung der Biomassebildung und des Nährwertes von Gemüsekräutern durch die Lichtintensität und spektrale Lichtzusammensetzung zu beschreiben. Diese Erkenntnisse sollen dann dabei helfen, die optimalen Lichtbedingungen für die gewünschte Produktqualität einstellen zu können. Dies begrenzt sich nicht auf die Anwendung von Lichtmodifikationen im Gewächshausanbau, sondern bezieht auch die Pflanzenkultivierung unter vollständig kontrollierten Bedingungen mit ein, bei dem eine Optimierung der Lichtbedingungen eine besondere Bedeutung hat, da eine nicht angepasste spektrale Lichtzusammensetzung einen größeren Energieaufwand bzw. eine geringere Effizienz der Lichtnutzung darstellt. Die Untersuchungen erfolgen im Rahmen des Projektes „Energieeffizientes Gewächshaus durch lichtaktive Nanofolie“.

Aus diesen Gründen wird in der vorliegenden Arbeit der Anbau von *Persicaria odorata*, einem tropisch/subtropischen Gemüsekraut, unter geschützten Bedingungen im Gewächshaus und unter kontrollierten Bedingungen in Klimakammern durchgeführt. Durch Betrachtung eines breiten Inhaltsstoffspektrums und Variationen der Lichtbedingungen mit verschiedenen Grundbelichtungen, Supplementierung mit monochromatischen LEDs und Veränderungen der spektralen Lichtzusammensetzung durch Überdeckung der Pflanzen mit photoselektiven Folien, soll mit Hilfe des Vergleichs vieler Versuchsreihen die Beeinflussung der Biomassebildung und des Nährwerts der Pflanze durch ausgewählte Lichteigenschaften untersucht werden.

2. HINTERGRUND UND STAND DES WISSENS

„Das homogene Licht und Strahlen, welche rot erscheinen, oder vielmehr Objekte rot erscheinen lassen, nenne ich Rubrifick oder rot-erzeugend; solche, die Objekte gelb, grün, blau oder violett erscheinen lassen, gelb-erzeugend, grün-erzeugend, blau-erzeugend, violett-erzeugend und so weiter. Wenn ich von farbigen oder gefärbten Licht oder Lichtstrahlen spreche, so ist dies nicht wissenschaftlich oder im engeren Sinn zu verstehen, sondern umgangssprachlich gemeint. (...) Streng genommen sind Strahlen nicht gefärbt. Sie haben lediglich die Macht oder Disposition, die Empfindung dieser oder jener Farbe zu erregen.“

(Newton 1704, zit. nach (WRIGHT, 1963)).

Nachdem Newton bereits Anfang des 18. Jahrhunderts nachweisen konnte, dass sich das Licht aus verschiedenen Spektralbereichen zusammensetzt, wurde erst im 19. Jahrhundert durch den Physiker Heinrich Hertz belegt, dass es sich bei Licht um elektromagnetische Wellen handelt (KUCZERA, 1987) und der visuelle Farbeindruck folglich auf der Wahrnehmung bestimmter Wellenlängen elektromagnetischer Strahlung beruht. Phototrophen Lebewesen dient die elektromagnetische Strahlung mit wellenlängenabhängigen Energiegehalten bei Absorption durch Photosynthesepigmente als Energiequelle für die Synthese von Photosynthaten und, absorbiert durch Photorezeptoren, als Signal für Photomorphogenese und Photoperiodismus. Im Laufe ihrer Evolution haben Pflanzen Anpassungsmechanismen entwickelt, um auch bei natürlich vorkommenden Veränderungen die Lichtverhältnisse optimal zu nutzen. Die Adaptationsfähigkeit von Pflanzen auf Veränderungen des Lichtspektrums und -intensität kurzfristig durch Witterung, temporäre Schattierungen und Sonnenstand, mittelfristig durch Jahreszeiten, Schattenbildung benachbarter Pflanzen und langfristig durch Klima und geographische Lage (HOGEWONING et al., 2010a; LEE und DOWNUM, 1991) ist Grundlage für die vorliegenden Untersuchungen.

Für ein besseres Verständnis werden im folgenden Abschnitt die natürlichen Veränderungen des Lichtspektrums und -intensität dargestellt. Da diese nur ansatzweise in der Literatur beschrieben werden und Messungen mit verschiedenen Methoden, mit Bezug auf verschiedene Messgrößen und vor allem für andere Regionen durchgeführt wurden, wird die Literaturrecherche unterstützt durch eigene Lichtmessungen am Versuchsstandort in Berlin.

2.1 Lichtintensität und Lichtspektren

Sonnenlicht gehört, ebenso wie andere glühende Körper zu den thermischen Lichtquellen, die durch ein kontinuierliches Breitbandspektrum charakterisiert sind. Viele künstliche Energiequellen sind hingegen

nicht-thermische Lichtquellen und zeichnen sich entsprechend durch ein nicht-kontinuierliches, diskretes Spektrum mit Linien oder Banden aus. Die Lichtintensität wird bei thermischen und nicht-thermischen Quellen durch die Photonenmenge definiert, wobei es für pflanzenphysiologische Prozesse ge­läufig ist, die Photonenmenge des photosynthetisch relevanten Spektralbereichs (photosynthetic active radiation = PAR) von 400-700 nm anzugeben (MCCREE, 1972). Das Lichtspektrum hängt von der Energie der Photonen ab und wird meist auf Grundlage der farberzeugenden Wirkung in einzelne Bereiche eingeteilt. Gängig im Pflanzenbau ist die Einteilung in blaues, grünes und rotes Licht.

2.1.1 Sonnenlicht und Witterungseinflüsse

Die meteorologisch bedeutsame Solarstrahlung umfasst den Spektralbereich von 300-3000 nm und macht etwa 96% der extraterrestrischen Sonnenstrahlung aus. Von der gesamten Sonnenenergie können 48,7% für die photosynthetische Energiegewinnung genutzt werden. In diesem Spektralbereich ist das Lichtspektrum des Sonnenlichts relativ gleichmäßig ohne starke Emissionslinien (Abbildung 2.1). Oberhalb von 740 nm beinhalten die Photonen zu wenig Energie, um die Photosynthese in höheren Pflanzen anzutreiben (SPITTERS et al., 1986; ZHU et al., 2008b).

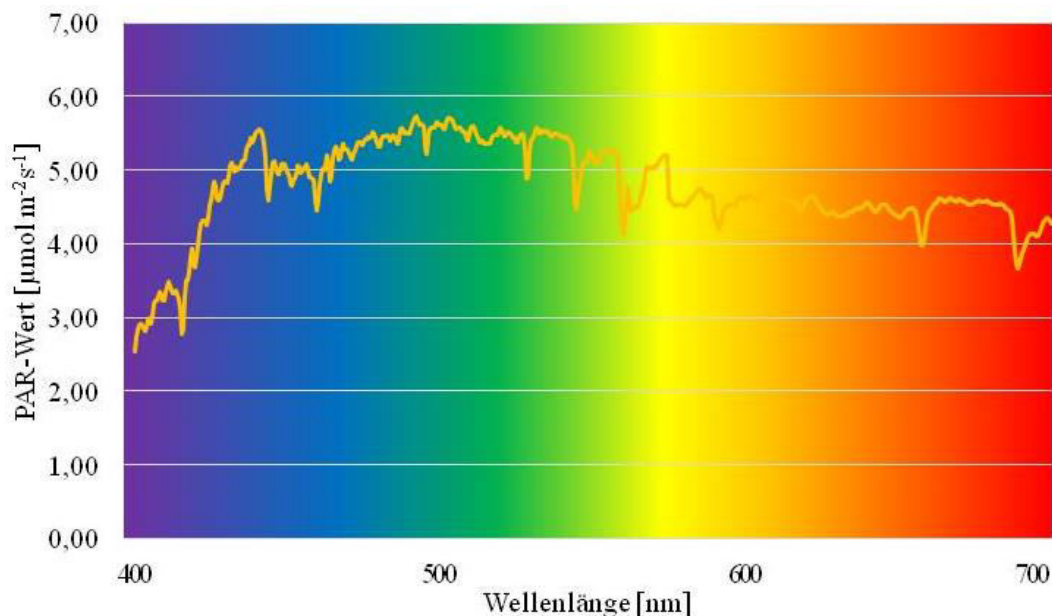


Abbildung 2.1: Lichtspektrum der territorialen Solarstrahlung in Berlin Dahlem, Lentzeallee 75; eigene Messungen am 24.06.2019 um 13:08 Uhr; gemessen mit dem SpectraWiz Spectroradiometer PS-100

Neben der PAR sind die Bereiche UV-B (280-320 nm), UV-A (320-400 nm) und Fernrot (725-735 nm) (IQBAL, 1983; LEE und DOWNUM, 1991) biologisch relevant für die Signalübermittlung durch UVR-8-Photorezeptoren und Phytochrome (siehe Abschnitt 2.2.2.1).

Die extraterritoriale Sonnenstrahlung wird beim Durchgang durch die Atmosphäre durch Absorption, Reflexion und Streuung verändert. Aerosole in der Atmosphäre verringern die Strahlungsstärke um durchschnittlich 30%. Wichtige Absorber sind Wasserdampf (bewirken eine Reduktion der Bestrahlungsstärke um 12-15%), Wolken (8-9%), Staub (4-9%) und die lokale Luftverschmutzung (1-6%) (MONTEITH, 1962). Da der Streuungsgrad invers proportional ist zur Potenzfunktion der Wellenlänge

der Photonen, werden photosynthetisch nutzbare Wellenlängen (400-700 nm) um 40% stärker gestreut als die Gesamtstrahlung (300-3000 nm) (SPITTERS et al., 1986). Dieses, auch als Rayleigh-Streuung bekannte Phänomen, führt durch eine vergleichbar höhere Streuung des blauen Spektralbereichs zu der Blaufärbung des Himmels bei Sonnenschein (BOHREN und FRASER, 2006).

Darüber hinaus führen Gase durch spezifische Absorptionseigenschaften zu Veränderungen der spektralen Lichtzusammensetzung. Wasserdampf absorbiert primär im fernroten Spektralbereich (>700 nm) (LACIS und HANSEN, 1974; ZHU et al., 2008b), wobei die α -Absorptionsbande bei 728 nm liegt und somit im Absorptionsmaximum des aktivierten Phytochroms (Pfr) (GÓRSKI, 1980, 1976; LEE und DOWNUM, 1991). Ozon absorbiert hingegen vorwiegend kürzere Wellenlängen, wodurch die energiereiche Strahlung mit Wellenlängen < 300 nm fast vollständig absorbiert und bei der Bestimmung der Gesamtstrahlung vernachlässigt wird. Zusätzlich liegt in der Chappuis-Absorptionsbande des Ozons (500-700 nm) (LACIS und HANSEN, 1974; THORINGTON, 1985; ZHU et al., 2008b) das Maximum des Phytochrom-Aktionsspektrums mit 660 nm (siehe Abschnitt 2.2.2.1). Dadurch können die absoluten Wasserdampf- und Ozongehalte in der Atmosphäre das pflanzenphysiologisch relevante R:FR-Verhältnis beeinflussen, insbesondere im Tages- und Jahresverlauf (GÓRSKI, 1980, 1976; LEE und DOWNUM, 1991). Da das Licht kurz vor und während der Dämmerungsphasen durch den niedrigen Sonnenstand eine längere Weglänge durch die Ozonschicht in 15-30 km Höhe zurücklegen muss, wird das Rotlicht zu diesen Tageszeiten stärker durch die Ozon-Chappuisbande absorbiert (GÓRSKI, 1980; HUGHES et al., 1984; HULBURT, 1953). Dies hat einen größeren Einfluss auf die Lichtzusammensetzung als die Rayleigh-Streuung (LEE et al., 2011) und führt zu einem Anstieg des B:R-Verhältnisses bei Sonnenauf- und untergang (HUGHES et al., 1984; LEE und DOWNUM, 1991; ROBERTSON, 1966) und zu einem Abfall des R:FR-Verhältnisses (GÓRSKI, 1980, 1976; HOGEWONING et al., 2010a; LEE und DOWNUM, 1991; MORTENSEN und MOE, 1992a; ROBERTSON, 1966; SMITH und HOLMES, 1977) unmittelbar vor dem Sonnenuntergang (KASPERBAUER, 1987) (siehe Abbildung 2.2). Der Reduktion des R:FR-Verhältnisses wird deswegen eine zentrale Funktion bei der Wahrnehmung der Tageslänge zugesprochen und induziert bei entsprechender Tageslänge den Übergang von der vegetativen in die generative Phase (CRAIG und RUNKLE, 2013; RUNKLE und HEINS, 2001). Deutlicher sind während der Dämmerungsphasen jedoch die simultan verlaufenden Änderungen der Lichtintensität (HUGHES et al., 1984), wodurch zahlreiche Prozesse beeinflusst werden (siehe Abschnitte 2.2.2 und 2.2.3). Unabhängig von den Dämmerungsphasen ist die spektrale Lichtzusammensetzung im Tagesverlauf weitgehend konstant bei starken Veränderungen des PAR-Wertes. Dieser ist am höchsten zum Zeitpunkt des Höchststandes der Sonne (Abbildung 2.2). Bezogen auf die Gesamtstrahlung ist der Anteil der photosynthetisch aktiven Strahlung jedoch weitgehend unabhängig vom Sonnenstand (SPITTERS et al., 1986; ZHU et al., 2008b).

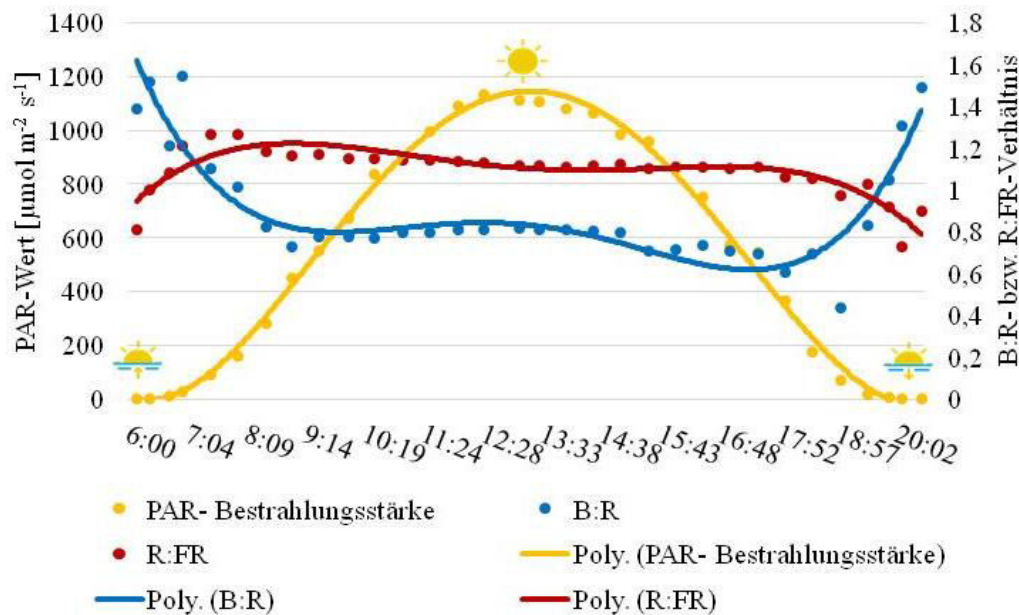


Abbildung 2.2: Veränderung der spektralen Lichtzusammensetzung in Abhängigkeit von der Tageszeit in Berlin Dahlem, Lentzeallee 75; Messtag: 09.04.2019; gemessen mit dem SpectraWiz Spectroradiometer PS-100; dargestellt sind die Messwerte (Punkte) und Trendlinien als Polynom vierten Grades; Icons zeigen Sonnenaufgang, Tageshöchststand und Sonnenuntergang (eigene Messung)

Die Tages- und Nachtlängen, ebenso wie die Dauer der Dämmungsphasen, variieren in Abhängigkeit vom Breitengrad:

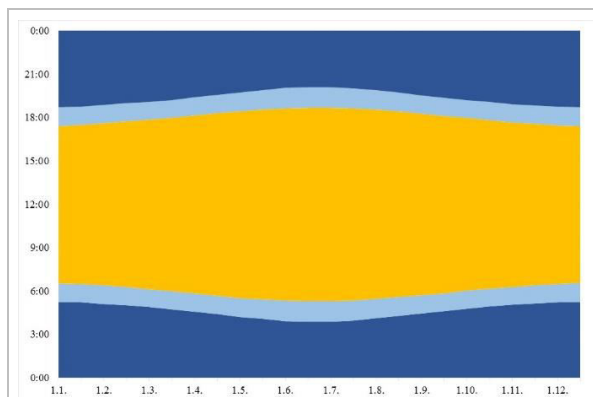


Abbildung 2.3: Tageslänge in Hanoi (Nordvietname) im Jahresverlauf; Dämmerung bezieht sich auf die astronomische Dämmerung mit einem Sonnenstand von 12-18° unterhalb des Horizonts (TIME AND DATE AS, 2018a)

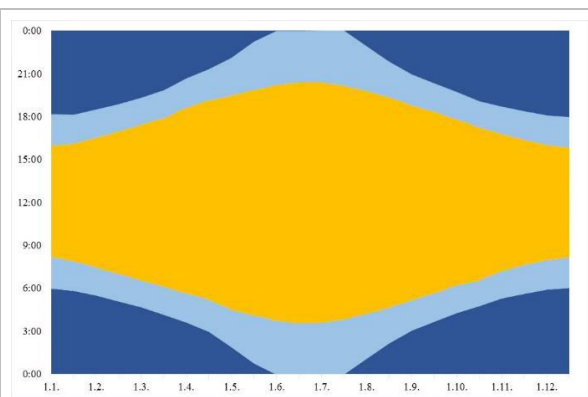


Abbildung 2.4: Tageslänge in Berlin im Jahresverlauf (bezogen auf Winterzeit); Dämmerung bezieht sich auf die astronomische Dämmerung mit einem Sonnenstand von 12-18° unterhalb des Horizonts (TIME AND DATE AS, 2018b)

In Hanoi (21°02'77,64" nördliche Breite), Hauptstadt des Herkunftslandes Vietnam der Versuchspflanze *Persicaria odorata*, variiert die Tageslänge zwischen 10 Stunden 51 Minuten und 13 Stunden 25 Minuten. Die astronomische Nacht umfasst entsprechend 10 Stunden 30 Minuten bis 7 Stunden 45 Minuten. Die Dämmerungsphase beträgt relativ konstant 80-85 Minuten (Abbildung 2.3) (TIME AND DATE AS, 2018a). In Berlin (52°31'55,20" nördliche Breite), Standort der durchgeführten Versuche, hingegen liegt die Tageslänge zur Sommersonnenwende bei 16 Stunden 50 Minuten, eine astronomische

Nacht findet nicht statt. Zur Wintersonnenwende beträgt die Tageslänge 7 Stunden 39 Minuten, die Nacht umfasst 12 Stunden 5 Minuten (Abbildung 2.4) (TIME AND DATE AS, 2018b).

Als Standort mit einem Breitengrad außerhalb der Wendekreise gibt es in Berlin jahreszeitenabhängig große Schwankungen des Einstrahlungswinkels, wodurch im Winter nur 24%, im Sommer 40% der extraterritorialen Strahlung die Erdoberfläche erreicht. Zusätzlich wird das Licht verschieden stark gestreut. Im Winter kann von fast doppelt so viel diffusem Licht wie direktem Licht ausgegangen werden, im Sommer ist das Verhältnis weitgehend ausgeglichen (MONTEITH, 1962). Dadurch kann in den strahlungsschwachen Wintermonaten die verfügbare Sonnenstrahlung besser durch die Pflanzen genutzt werden (siehe Abschnitt 2.1.2.2). Anders als die Lichtintensität wird das Lichtspektrum nur geringfügig durch die Jahreszeit beeinflusst (KÄMMERLING et al., 2017). Bedingt durch den jahreszeitenabhängig höchsten Ozongehalt in der Atmosphäre im März und April (GÓRSKI, 1976; LEE et al., 2011) kann im Winter von einem geringfügig höherem B:R-Verhältnis ausgegangen werden (1,40 bzw. 1,31, gemessen in Miami; LEE and DOWNUM, 1991), möglicherweise verstärkt durch eine geringere Luftverschmutzung natürlichen Ursprungs, beispielsweise aufgewirbelten Staub, Pollen, Sporen und kleine Insekten (MONTEITH, 1962), welche vorwiegend blaues Licht absorbieren (SMITH, 1982). Durch eigene Messungen (Abbildung 2.5) bestätigt wird ein minimales R:FR-Verhältnis im Frühling und ein Maximum im Spätsommer und Herbst (GÓRSKI, 1980, 1976), welches als ein entscheidender Faktor für den jahreszeitenabhängigen Photoperiodismus angesehen wird (GÓRSKI, 1980).

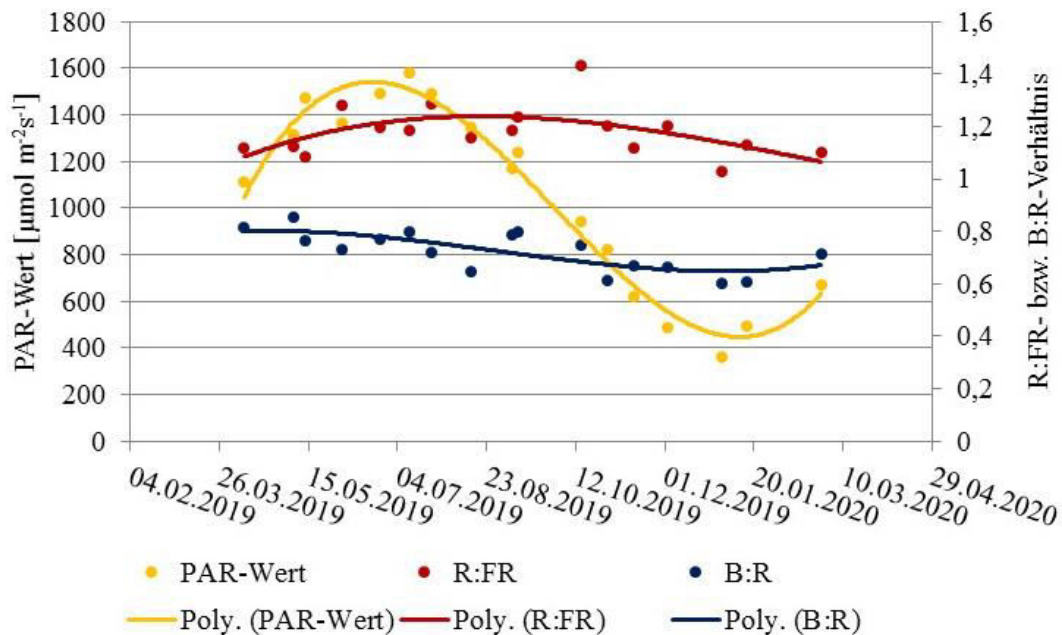


Abbildung 2.5: Veränderung der spektralen Lichtzusammensetzung im Jahresverlauf in Berlin Dahlem, Lentzeallee 75; Messzeitpunkt: Tageshöchststand der Sonne, Witterung: sonnig; gemessen mit dem SpectraWiz Spectroradiometer PS-100; dargestellt sind die Messwerte (Punkte) und Trendlinien als Polynom dritten Grades

Neben Einstrahlungswinkel und Jahreszeit bewirken auch steigende Höhenlagen eine Verringerung des Rotlichtanteils mit resultierendem Anstieg des Blaulichtanteils und einer Verringerung des R:FR-Verhältnisses (LEE und DOWNUM, 1991).

Unabhängig vom geographischen Standort sind die Wolken einer der wichtigsten Einflussfaktoren auf die Sonnenstrahlung in der Troposphäre. Der Anteil der photosynthetisch aktiven Strahlung an der Gesamtstrahlung wird nicht verändert (SPITTERS et al., 1986; ZHU et al., 2008b), wodurch den Pflanzen unabhängig von Tages- und Jahreszeit sowie Witterung immer der gleiche Lichtanteil für die Photosynthese zur Verfügung steht. Wolken bewirken vorwiegend eine Reduktion des PAR-Wertes. In den Subtropen kann eine fast durchgehend hohe Bewölkungsdichte während der Regenzeit die Sonnenstrahlung über mehrere Monate verändern. Während in der Trockenzeit mittags PAR-Werte von etwa 600 W m^{-2} ($\cong 1380 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, berechnet nach MEYER, 1996) erreicht werden (Abbildung 2.6), betragen die Lichtintensitäten unter einer durchgehenden Wolkendecke während der Regenzeit mitunter $< 80 \text{ W m}^{-2}$ ($\cong 184 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, berechnet nach MEYER, 1996) (Abbildung 2.7).

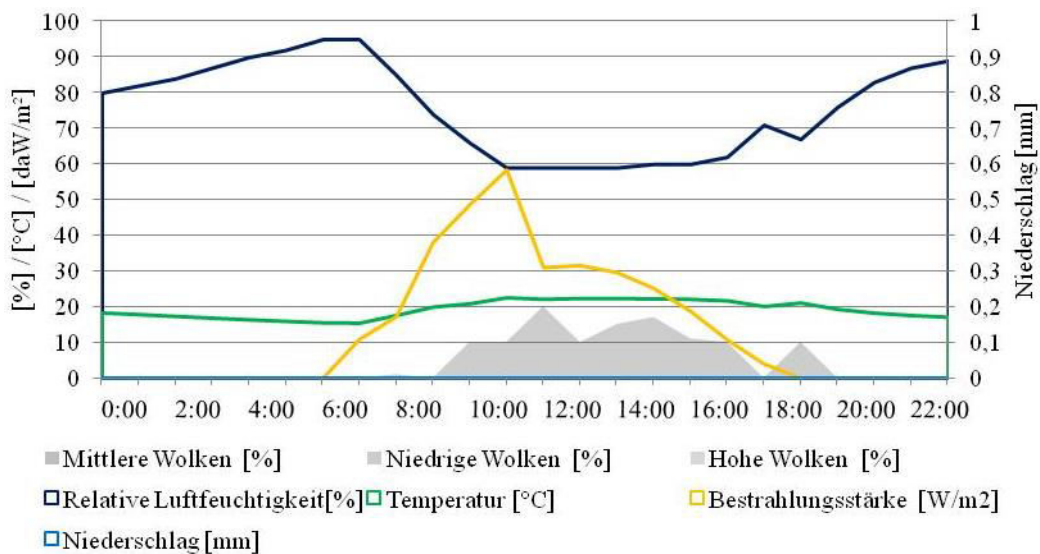


Abbildung 2.6: Bewölkung, Niederschlag, relative Luftfeuchtigkeit, Temperatur und PAR-Wert (angegeben in deka W/m^2) in Hanoi (Nordvietnam) im Tagesverlauf; Daten für den 27.01.2019, Trockenzeit in Hanoi, Vietnam; 1 W/m^2 entspricht $2,3 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (eigene Abbildung mit Daten nach: METEOBLUE, 2018)

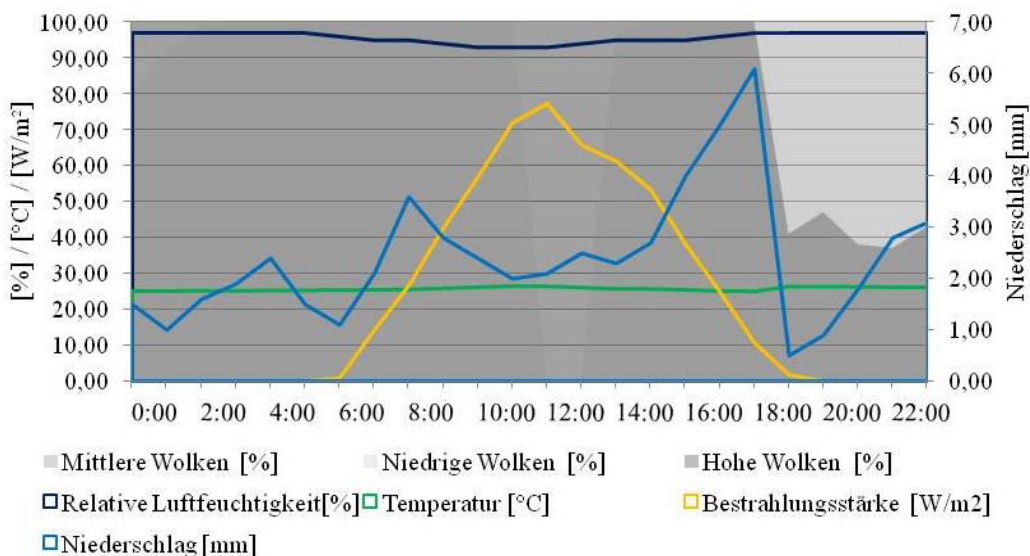


Abbildung 2.7: Bewölkung, Niederschlag, relative Luftfeuchtigkeit, Temperatur und PAR-Wert (angegeben in W/m^2) in Hanoi (Nordvietnam) im Tagesverlauf; Daten für den 17.08.2018, Regenzeit in Hanoi, Vietnam; 1 W/m^2 entspricht $2,3 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (eigene Abbildung mit Daten nach: METEOBLUE, 2018)

Die Bewölkung beeinflusst zudem die Lichtqualität. Ein veränderter Streuungsgrad der Strahlen führt zu einer Erhöhung des Anteils an diffusem Licht um das 2-4-fache (HUGHES et al., 2015), resultierend in einer starken Reduktion der Schattenbildung durch Laubdächer (RODERICK et al., 2001). Bei schattenadaptierten Pflanzen unter einem Laubdach führt die Erhöhung des diffusen Anteils des Lichtes zu einer verbesserten vertikalen Verteilung und Steigerung der Photosyntheserate (URBAN et al., 2012; YOUNG und SMITH, 1983). Bei sonnenadaptierten Blättern bewirkt eine Bewölkung hingegen durch die Reduktion der Bestrahlungsstärke eine Verringerung der Kohlenstofffixierung (HUGHES et al., 2015; URBAN et al., 2012).

Daneben wird ein leichter Anstieg der Blau- und Fernrotanteils beschrieben (HOGEWONING et al., 2010a; LEE und DOWNUM, 1991; ROBERTSON, 1966; SMITH, 1982), während der Rotlichtanteil reduziert wird, resultierend in einem Anstieg des B:R-Verhältnisses (REINHARDT et al., 2010). Der leichte Anstieg des Blaulichtanteils wird auf eine stärkere Streuung der kurzen Wellenlängen durch Aerosole und die atmosphärische Feuchtigkeit zurückgeführt (GATES, 1966) und könnte aufgrund der Nutzung für die photosynthetische Energiegewinnung und die Induktion der Stomataöffnung eine biologische Bedeutung haben (REINHARDT et al., 2010).

Jedoch wurde bei eigenen Messungen in Abhängigkeit von der Wolkenart eine abweichende Beeinflussung der spektralen Lichtzusammensetzung beobachtet (Abbildung 2.8), möglicherweise zurückführbar auf Unterschiede in den imaginären Brechungs- bzw. Absorptionsindexen zwischen Eis- und Wassermolekülen. Bei den meisten Spektralbereichen weist Wasser einen höheren Absorptionsindex auf. Ein höherer Brechungsindex von Eis führt hingegen zu einer stärkeren Beeinflussung des blauen Spektralbereichs (COSTA et al., 2007) (Abbildung 2.8).

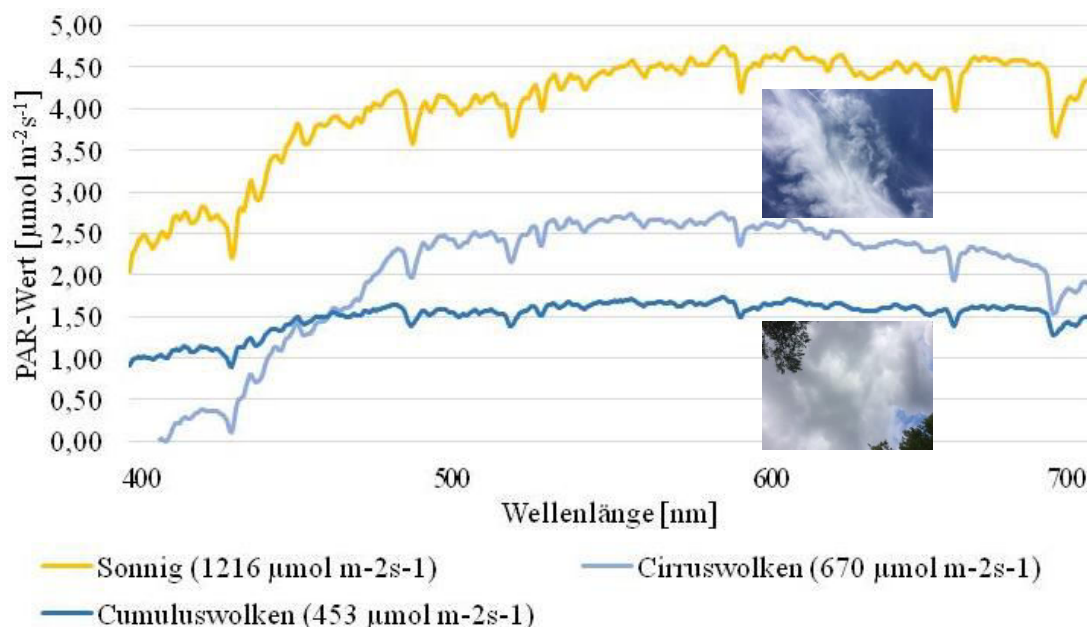


Abbildung 2.8: Lichtspektrum Sonnenlicht und Veränderungen durch Cirrus-(Eis) Wolken bzw. Cumulus-(Wasser) Wolken in Berlin Dahlem, Lentzeallee 75; eigene Messungen am 13.08.2018 um 12:00 Uhr (Cirruswolken) und 14.08.2018 um 12:00 Uhr (Cumuluswolken); gemessen mit dem SpectraWiz Spectroradiometer PS-100

Während die geographische Lage und klimatische Faktoren nicht beeinflussbar sind, hängen Schattierungen durch benachbarte Pflanzen mit der Pflanzendichte zusammen, wodurch eine Einflussnahme in einem gewissen Maße möglich ist. Das Wachstumsumfeld ist ein viel beschriebener Einflussfaktor auf die Bestrahlungsstärke und die spektrale Lichtzusammensetzung (Abbildung 2.10, Tabelle 2.2; SANDER W. HOGEWONING et al., 2010). Dies kann temporär durch eine jahreszeitlich bedingte Pflanzen- und Blätterdichte, oder permanent begründet sein. Die Reduktion der Lichtintensität bedingt durch die Absorption eines Blattes kann etwa 80% des sichtbaren Sonnenlichts betragen (RODERICK et al., 2001), wobei vor allem der UV-Licht- und PAR-Bereich reduziert werden (Abbildung 2.9). Im blauen und roten Spektralbereich wird über 95% des Lichtes durch das Blatt absorbiert, im grünen Spektralbereich 70-90% (KASPERBAUER, 1987; ZUR et al., 2000). Transmittiert und reflektiert werden fernrote Wellenlängen mit einer daraus resultierenden Reduktion des R:FR-Verhältnisses (CASAL, 2013; HOLMES und SMITH, 1977; LEE und DOWNUM, 1991; LI et al., 2011a). Die Anpassungsmechanismen der Pflanzen auf ein verändertes Wachstumsumfeld sind vielfältig und umfassen photorezeptorabhängige und –unabhängige Reaktionen als Antwort auf eine reduzierte Bestrahlungsstärke, einen verringerten Blaulichtanteil und ein verringertes R:FR-Verhältnis (siehe Abschnitt 2.2.2), resultierend in einer Vielzahl an Schattenvermeidungsreaktionen (siehe Abschnitt 2.2.3).

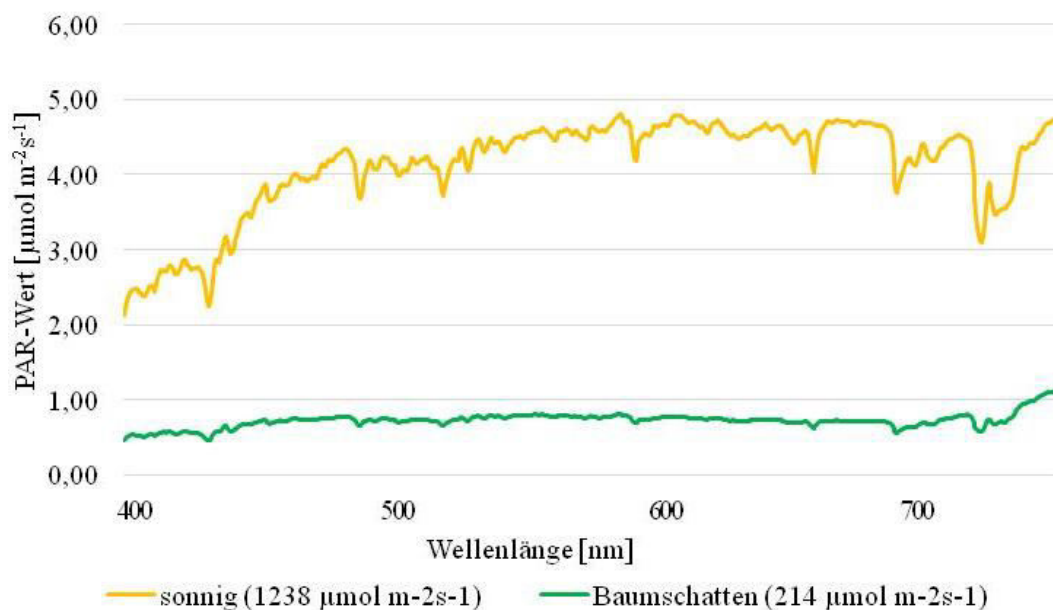


Abbildung 2.9: Lichtspektrum Sonnenlicht mit und ohne Baumschatten in Berlin Dahlem, Lentzeallee 75 (eigene Messung am 14.08.2018 um 12:00 Uhr); Reduktion des R:FR-Verhältnisses von 1,27 (sonnig) auf 0,53 (Baumschatten); gemessen mit dem SpectraWiz Spectroradiometer PS-100

Der Einfluss benachbarter Blätter bzw. des Pflanzenbestands ist jedoch auch von der Witterung und anderen Umweltfaktoren abhängig. Eine Erhöhung des diffusen Lichtes durch Bewölkung führt zu einer geringeren Schattenbildung durch Blätter. Bei klarem Sonnenschein kommt das Licht hingegen aus einer Richtung, wodurch die Schattenwirkung deutlich steigt (RODERICK et al., 2001). Vergleichbares gilt für Aerosole, beispielsweise nach einer Vulkaneruption. Durch das vermehrt diffuse Licht wird die Schattenwirkung der Pflanzen verringert und somit unter Umständen die CO_2 -Aufnahme durch die Vegetation gesteigert (RODERICK et al., 2001).

2.1.2 Modifikationen von Lichtintensität und –spektren im Gartenbau

Im Gewächshausanbau werden aktuell verschiedene Beleuchtungssysteme eingesetzt, um eine weitgehend jahreszeitenunabhängige Versorgung mit Gartenbauerzeugnissen gewährleisten zu können. Während bislang meistens eine Erhöhung der Bestrahlungsstärke zwecks Steigerungen der Biomasseakkumulation Priorität hatte, werden aktuell vermehrt auch Beleuchtungssysteme und Überdeckungen eingesetzt, die zusätzlich das Lichtspektrum beeinflussen. In diesem Abschnitt werden Beleuchtungssysteme vorgestellt, die im Gartenbau und teilweise auch für die vorliegende Arbeit von Bedeutung sind (Abschnitt 2.2.1.1). Überdeckungen mit Folien oder Netzen stellen Alternativen dar, die häufig der Schattierung dienen, jedoch auch vermehrt eingesetzt werden für die Modifikation des Lichtspektrums (Abschnitt 2.2.1.2).

2.1.2.1 Einsatz zusätzlicher Lichtquellen

Als gängige Beleuchtungssysteme im Gartenbau zeichnen sich Natriumhochdruck- und Fluoreszenzlampen durch ein Lichtspektrum mit ausgeprägten Emissionslinien aus. Dadurch unterscheidet sich das Spektrum deutlich vom Sonnenlichtspektrum (HOGEWONING et al., 2010a). **Fluoreszenzlampen**, auch als Leuchtstoffröhren bekannt, werden für die Beleuchtung von Innenräumen verwendet. Zum Einsatz kommen weiße Fluoreszenzlampen mit hohen Blau- und Rotlichtanteilen (DARKO et al., 2014) vorwiegend bei vollständig kontrollierten Bedingungen (HEMMING, 2011). Mit PAR-Effizienzwerten von max. 40% liegen sie im Bereich der Natriumhochdrucklampen. Die Strahlungsintensität nimmt jedoch mit der Zeit stark ab (DARKO et al., 2014).

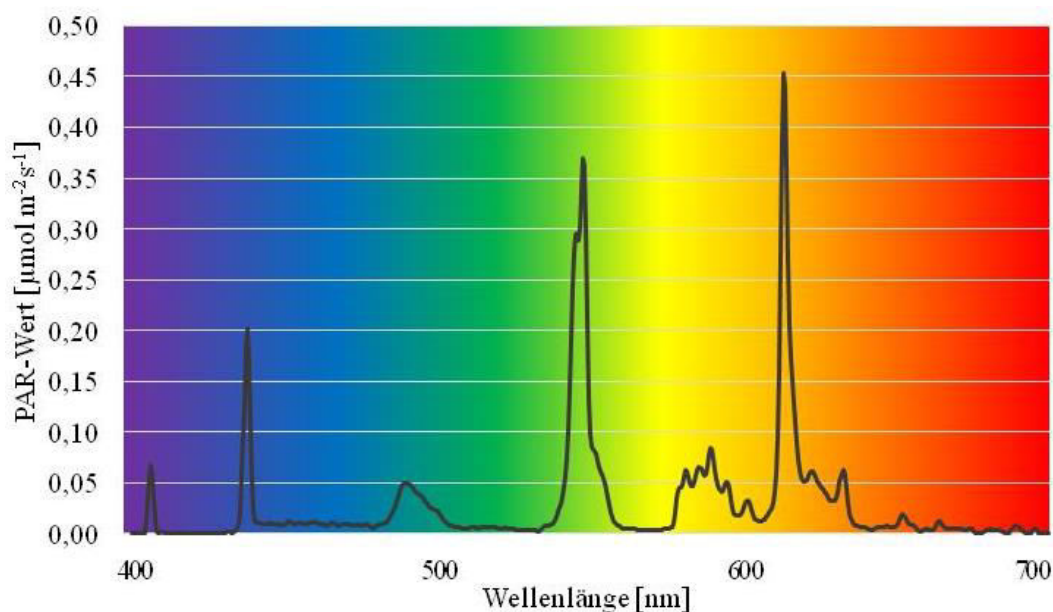


Abbildung 2.10: Lichtspektrum Fluoreszenzlampe Innenraum; Typ: OSRAM L 58W/21-840; gemessen mit dem SpectraWiz Spectroradiometer PS-100

Im Gewächshaus haben sich als Zusatzbestrahlung **Natriumhochdrucklampen** (HPS = High Pressure Sodium Lamps) etabliert. Es handelt sich um Lampen mit einem Breitbandspektrum (Abbildung 2.11),

deren spektrale Lichtzusammensetzung ausgeglichener ist als bei Fluoreszenzlampen. Charakteristisch für das Natriumhochdrucklampen-Lichtspektrum ist ein hoher Anteil an Grün-, Gelb- und UV-Licht sowie ein verändertes R:FR-Verhältnis (DARKO et al., 2014). Die Energieeffizienz ist bei einem Lichtoutput von maximal $1,9 \mu\text{mol PAR m}^{-2}\text{s}^{-1}$ pro Watt Energieinput relativ hoch (HEMMING, 2011) und die PAR-Effizienz mit max. 40% vergleichbar mit den Fluoreszenzlampen. Die Effizienz der Lampen wird verringert durch die hohe Betriebstemperatur, die einen pflanzennahen Einsatz ausschließt (DARKO et al., 2014) und unter Umständen energieaufwendige Kühlungen erforderlich macht (VAN IEPEREN und TROUWBORST, 2008).

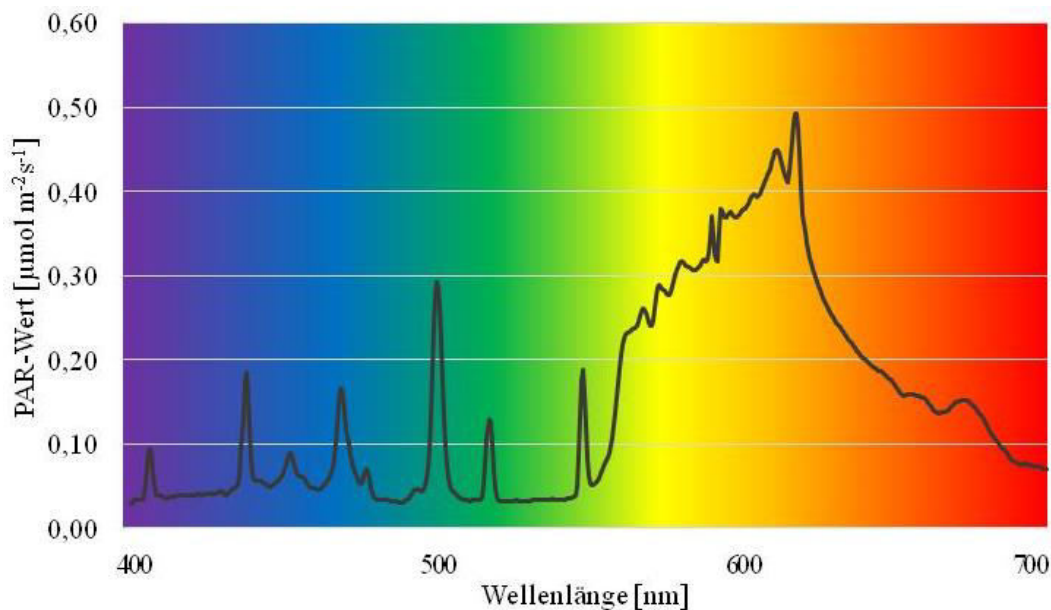


Abbildung 2.11: Lichtspektrum Natriumhochdrucklampen (SON-K400, 400W) im Forschungsgeächshaus der Humboldt-Universität zu Berlin: Berlin Dahlem, Albrecht-Thaer-Weg; gemessen mit dem SpectraWiz Spectroradiometer PS-100

Auch das Lichtspektrum, dessen Emissionsbanden nicht mit den Absorptionsspektren der Photosynthesepigmente (Abbildung 2.14) und Photorezeptoren (Abbildung 2.15) übereinstimmt, begrenzt die Effizienz der Natriumhochdrucklampen als Beleuchtungssysteme im Gartenbau. Auf der Suche nach einer energieeffizienten Alternative zu den Natriumhochdrucklampen bieten sich **LEDs** an. Diese emittieren keine Infrarotstrahlung, wodurch gegenüber Natriumhochdrucklampen der Energieverbrauch um ca. 60% sinkt (GOMEZ et al., 2013; HEMMING, 2011). Da es durch die alleinige Nutzung von LEDs jedoch nur zu geringfügigen Temperaturerhöhungen kommt, muss gegebenenfalls, je nach Jahreszeit und Klimazone, mehr geheizt werden als bei Beleuchtungen mit Natriumhochdrucklampen. Dies bedeutet höhere Heizkosten und verringert die korrigierten Energieeinsparungen (OUZOUNIS et al., 2018). Jedoch ermöglicht die geringe Wärmeabgabe eine Verwendung der LEDs unmittelbar oberhalb der Pflanzen, wodurch die Beleuchtungseffizienz hoch ist (MORROW, 2008; VAN IEPEREN und TROUWBORST, 2008). Während bei niedrig wachsenden Pflanzen wie Erdbeeren eine oberseitige Beleuchtung bereits die Ernteerträge erhöht (HIDAKA et al., 2013), können diese bei hochwachsenden Pflanzen durch eine Platzierung der LEDs innerhalb der Pflanzen (*intracanopy lighting*), resultierend in einer verbesserten vertikalen Lichtverteilung (GUO et al., 2016b), gesteigert werden (FRANTZ et al., 2000; TROUWBORST et al.,

2011). Als Folge werden Stomataschließungen reduziert und die Photosynthese untenliegender Blätter gefördert (DAVIS und BURNS, 2016; FRANTZ et al., 2000; SONG et al., 2016).

Bedingt durch das Schmalbandspektrum der LEDs ist zudem eine gezielte Supplementierung mit einzelnen Spektralbereichen möglich. Dadurch kann die Lichtzusammensetzung auf das Absorptionsspektrum der photosynthetisch aktiven Pigmente abgestimmt werden (HOGEWONING et al., 2010a). In Abhängigkeit von dem gewählten Lichtspektrum kann bis zu 80-100% der emittierten Strahlung photosynthetisch genutzt werden, wodurch die LEDs von allen künstlichen Beleuchtungssystemen die höchste PAR-Effizienz aufweisen (DARKO et al., 2014). Durch die Einstellung des Lichtspektrums und, bei dimmbaren LEDs, der Bestrahlungsstärke, können LEDs als photoperiodische, ergänzende oder photomorphologische Beleuchtung für zahlreiche Pflanzenspezies verwendet werden (MORROW, 2008). Art-spezifisch werden in Abhängigkeit von der Bestrahlungsstärke und spektralen Lichtzusammensetzung der verwendeten LEDs unterschiedliche Reaktionen beobachtet (siehe auch Abschnitte 2.2.3 und 2.3). Häufig zeigt jedoch eine polychromatische Ergänzung, beispielsweise mit weißen, blauen und roten LEDs, den stärksten positiven Effekt auf das Pflanzenwachstum (LIN et al., 2013; LU et al., 2012; SÄRKKÄ et al., 2017; SONG et al., 2016). Hohe Anschaffungskosten und eine hohe Anzahl an erforderlichen LED-Einheiten limitieren derzeit die Anwendbarkeit im kommerziellen Gartenbau (MORROW, 2008). Neben dem Einsatz von LEDs als Gewächshausbeleuchtung werden die Leuchtsysteme auch bei kontrollierten Anbauformen (*vertical gardening*) eingesetzt (DARKO et al., 2014). Gewächsschränke mit LED-Beleuchtung der Firma Infarm sind mittlerweile in vielen Berliner Supermärkten zu finden (Abbildung 2.12).

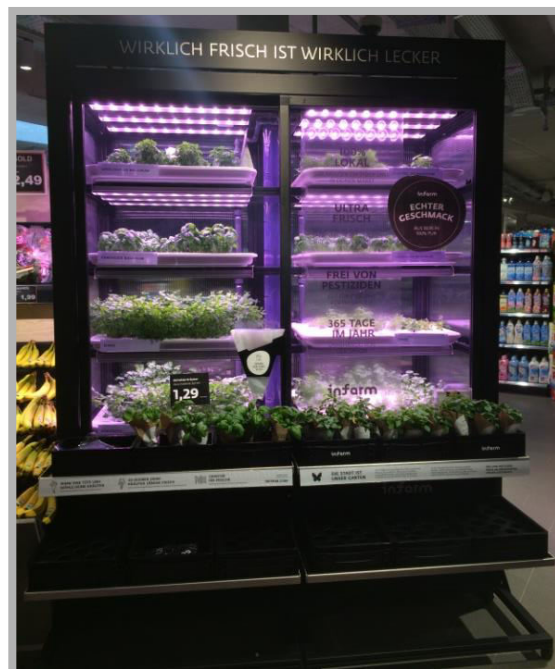


Abbildung 2.12: Gewächsschrank mit LED-Beleuchtung im Supermarkt (eigene Aufnahme: aufgenommen in EDEKA, Templiner Straße 12, 10119 Berlin)

2.1.2.2 Einsatz von Netzen und Folien

Eine andere Art der Lichtmodifikation ist die gezielte Absorption oder Reflexion durch Netze, Filter und Folien aus verschiedenen Materialien. Wie auch bei Belichtungssystemen handelt es sich um eine nicht-chemische Alternative zur Wachstumsbeeinflussung. Die Überdeckungen sind zudem während ihrer Nutzungsphase energieneutral.

Netze finden Anwendung im Freiland oder kombiniert mit Gewächshaustechnologien und werden zu folgenden Zwecken eingesetzt:

- Gezielte Schattierungen zur Reduktion der Lichtintensität und Temperaturharmonisierung in Perioden mit hoher Lichtintensität bzw. subtropischen und tropischen Regionen (HEMMING, 2011), meist durch schwarze Netze (Schattierungsfaktor: 40-80%; SHAHAK et al., 2004)
- Schutz vor Hagel oder Schädlingen (Vögel, Insekten) durch transparente Netze (z.B. aus Nylon, geringe Garnstärke, dadurch kaum Beeinflussung des Lichtes) (HEMMING, 2011; SHAHAK et al., 2004)

Bedingt durch das Knüpfdesign bzw. -dichte kreieren Netze eine Mischung aus natürlichem, unmodifiziertem Licht und diffusem, spektral modifiziertem Licht mit unterschiedlichem Schattierungsfaktor (SHAHAK, 2008; SHAHAK et al., 2004). Eine höhere Diffusität des Lichtes führt durch Verbesserungen der horizontalen und vertikalen Lichtverteilung, weniger Sättigungseffekten bei oben-liegenden Blättern, gesteigerten photosynthetischen Aktivitäten der unteren Blätter sowie höheren Blattflächenindizes zu einer Steigerung der Photosynthese (JONGSCHAAP et al., 2006; LI et al., 2014). Aufgrund des hohen Anteils an direkter Strahlung während der Sommermonate ist die Steigerung der photosynthetischen Aktivitäten durch Transformation in diffuses Licht in diesem Zeitraum am höchsten (JONGSCHAAP et al., 2006).

Während schwarze und transparente Netze die spektrale Lichtzusammensetzung nicht beeinflussen, modifizieren farbige, photoselektive Netze den UV-Bereich, sichtbare oder fernrote Spektralbereiche und/oder absorbieren infrarotes (IR) Licht (SHAHAK et al., 2004), wodurch eine gezielte Beeinflussung licht-regulierter, physiologischer Prozesse erreicht wird (SHAHAK, 2008).

Anders als Netze modifizieren photoselektive Filter bzw. Folien das gesamte Lichtspektrum (SHAHAK et al., 2004) und werden in Gewächshäusern oder als Tunnel im Freiland eingesetzt. Es gibt eine enorme Produktvielfalt, wobei zu den wichtigsten Eigenschaften der Folien Haltbarkeit, optische Eigenschaften und Antidrip- oder Antifogeffekte zählen. Die Folien bestehen hauptsächlich aus low-density-Polyethylen, Ethylen-Vinylacetat und Ethylen-Butylacrylat. Durch die Materialauswahl werden die lichtmodifizierenden Eigenschaften bestimmt. Während Folien aus low-density-Polyethylen geringe Transmissionen im UV-B-Bereich und im blauen Spektralbereich aufweisen, lässt Ethylen-Vinylacetat gleichmäßig

über den Wellenlängenbereich von 400-1100 nm das Licht durch (KITAS et al., 2012). Besondere optische Eigenschaften können zusätzlich durch mineralische Zusätze, Pigmente oder Copolymere von Ethylen-Vinylacetat oder Ethylene-Butylacrylat erreicht werden (ESPÍ et al., 2006).

Welche optischen Eigenschaften gefordert sind, hängt im Wesentlichen von der geographischen Lage der Anbauflächen mit den spezifischen klimatischen Besonderheiten und der gewünschten Wirkung ab:

- **Nicht-selektive Filter** erreichen eine Verringerung der Durchlässigkeit für alle Spektralbereiche und werden bei einer hohen, direkten Sonneneinstrahlung in tropischen und subtropischen Regionen verwendet, um bei wenig natürlich-diffusem Licht einer Schattenbildung innerhalb der Pflanzen und Verbrennungen der oberen Blätter entgegenzuwirken (ESPÍ et al., 2006).

Bei der Verwendung von nicht-selektiven Folien ist eine Lichtabsorption in der Regel unerwünscht, da ein Teil der absorbierten Energie als Wärmestrahlung ins Gewächshaus abgegeben und die Temperatur entsprechend erhöht wird. Stattdessen können durch Interferenzpigmente Teile des sichtbaren Lichts reflektieren und haben somit einen schattierenden Effekt (HOFFMANN und WAAIJENBERG, 2002) oder die Nahinfrarotstrahlung (700-3000 nm) vermindert werden (ESPÍ et al., 2006), wodurch eine Temperaturerhöhung reduziert wird. Eine Erhöhung des Anteils an diffusem Licht ist hingegen gewünscht. Verschiedene Überdeckungen aus Glas, Plastik oder temporäre Beschichtungen können verwendet werden, um direktes Licht in diffuses Licht umzuwandeln, resultierend in einer besseren horizontalen Lichtverteilung, geringeren Pflanzentemperaturen, einer verringerten Transpiration und einer höheren Photosyntheserate und Wachstum. Die Wirkung ist dabei höher in Regionen mit einer starken direkten Sonneneinstrahlung (HEMMING, 2011; HEMMING et al., 2008b). Bei höher wachsenden Pflanzen wie beispielsweise Tomaten führt eine Umwandlung des direkten Lichtes in diffuses Licht durch Plastikfolien insbesondere zu geringeren Luft- und Blatttemperaturen in den unteren Pflanzenregionen, resultierend in einer gesteigerten Photosynthese (ZHENG et al., 2020). Bei *Cucumis sativus* (HEMMING et al., 2008a) und Paprika (HEMMING et al., 2006) wurden dadurch die Ernteerträge gesteigert.

- **Photochrome Filter** passen ihr Absorptionsverhalten an den PAR-Wert an, **thermochrome Filter** reagieren auf die Temperatur (HOFFMANN und WAAIJENBERG, 2002).
- **Photosensitive Filter** zeichnen sich durch eine disproportionale Durchlässigkeit einzelner Wellenlängen aus. Die farbigen Materialien absorbieren die komplementären Spektralbereiche ihrer eigenen Farbe (HEMMING, 2011).

Photosensitive Filter werden bislang vor allem zur Reduktion des fernroten Spektralbereichs eingesetzt, wodurch eine verbesserte vegetative Entwicklung, resultierend in früheren Ernten mit besserer Qualität und Quantität (ESPÍ et al., 2006), sowie kompakteren Pflanzen mit geringerer Pflanzenhöhe und Internodienlänge (WILSON und RAJAPAKSE, 2001). In den 1970 und 1980er Jahren wurden zu diesem Zweck CuSO₄-Filter getestet. Durch die flüssigen Spektralfilter werden vorwiegend fernrote Spektralbereiche und, in einem geringeren Maße, auch rote Spektralbereiche des Sonnenlichts reduziert. Bei den meisten

Pflanzen konnten durch die Verwendung der Filter insgesamt kompaktere Pflanzen mit reduzierter Pflanzenhöhe und Internodienlänge beobachtet werden (RAJAPAKSE und KELLY, 1995). Durch Schwierigkeiten im Umgang, hohe Anschaffungskosten und phytotoxische Auswirkungen von CuSO_4 im Falle einer Beschädigung, sind die Filter bei der Anwendung problematisch (RAJAPAKSE et al., 1999; RAJAPAKSE und KELLY, 1995).

Neben der Reduktion des fernroten Spektralbereichs liegt ein weiterer Forschungsschwerpunkt auf dem Einsatz von Folien mit UV-blockierenden Eigenschaften. Eine geringe Durchlässigkeit für UV-Licht kann einen positiven Effekt auf die Frischmasse von Pflanzen haben, jedoch zu reduzierten Polyphenol- und Flavonoidgehalten führen (GARCÍA-MACÍAS et al., 2007). Zudem soll ein Schutz vor verschiedenen Krankheiten und Schädlingen erreicht werden, da bestimmte photosensitive Pilze UV-Licht benötigen, um Sporen zu bilden und sich zu vermehren. Auch werden viele pathogene Viren durch Insekten eingetragen, die UV-sensitive Photorezeptoren in ihren Sichtorganen haben. Eine Umgebung mit wenig UV-Licht ist entsprechend wenig attraktiv für die virenübertragenden Insekten (ESPÍ et al., 2006). Eine Besonderheit sind Folien mit fluoreszierenden Pigmenten. Das absorbierte Licht kann durch die fluoreszierenden Pigmente als zusätzliches blaues Licht emittiert werden (HEMMING, 2011; HEMMING et al., 2005), wodurch der photosynthetisch wirksame Spektralbereich verstärkt wird.

Im Gegensatz zu nicht-absorbierenden, schattierenden Folien, können einige Materialien auch in ungeheizten Gewächshäusern zum Schutz vor Frost eingesetzt werden bzw. in geheizten Gewächshäusern den Heizenergiebedarf senken (ESPÍ et al., 2006).

Ähnlich wie bei den LEDs waren auch die Kosten für viele Folien in den Anfängen der Testung sehr hoch für eine Anwendung im Gartenbau (ESPÍ et al., 2006; HOFFMANN und WAAIJENBERG, 2002; YANG et al., 2007a).

2.2 Lichtnutzung durch die Pflanzen

Veränderungen der Lichtbedingungen durch natürliche Einflussfaktoren (siehe Abschnitt 2.1.1) oder artifizielle Modifikationen (siehe Abschnitt 2.1.2) rufen Anpassungsmechanismen in den Pflanzen hervor. Phänotypisch sichtbar werden Veränderungen der Biomassebildung und Pflanzenentwicklung. Die Bildung von Biomasse beruht auf der photosynthetischen Energiegewinnung (siehe Abschnitt 2.2.1). Die Pflanzenentwicklung wird hingegen vorwiegend auf photorezeptorvermittelte Signalkaskaden als Reaktion auf Zeitpunkt, Intensität und spektrale Zusammensetzung des Lichtes zurückgeführt (BENNIE et al., 2016; LI et al., 2011a) (siehe Abschnitt 2.2.2).

2.2.1 Photosynthetische Energiegewinnung

Die Photosynthese ist ein photochemischer Prozess, bei dem Lichtenergie für den Aufbau organischer Strukturen verwendet wird. Die Photonen werden absorbiert und für einen Elektronentransport von einem Donator zu einem Akzeptor genutzt. Die entstandenen energiereichen Verbindungen ATP und NADPH werden im nachgeschalteten Citratzyklus u.a. für die Kohlenstofffixierung verwendet (DARKO et al., 2014; RUNGRAT et al., 2016). Zuständig für die Photosynthese sind Chloroplasten, in deren Thylakoidmembran sich die Photosysteme I und II einschließlich Elektronentransportkette und der ATP-Synthase befinden (DAUM et al., 2010). Die Kohlenstoffdioxidfixierung erfolgt im Stroma der Chloroplasten (HARBINSON und FOYER, 1991).

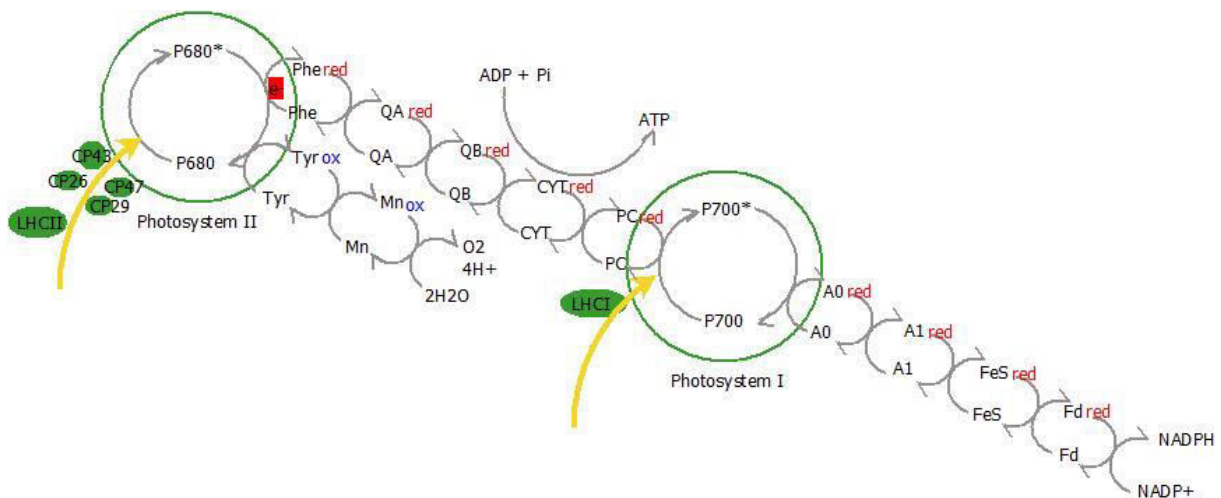


Abbildung 2.13: Photosynthetische Transformation von Lichtenergie zu energiereichen Verbindungen über den linearen Elektronentransport. Absorption von Sonnenlicht durch Pigmente der Lichtsammelkomplexe. Weiterleitung zu den reaktiven Zentren der Photosysteme II und I. Elektronentransportkette von Photosystem II über Phäophytin (Phe), Plastoquinone A und B (QA, QB), Cytochrome (CYT) und Plastocyanin (PC) zum Photosystem I (GREEN und DURNFORD, 1996). Elektronen werden anschließend weitergeleitet über spezialisierte Chlorophylle (A0), Phylloquinon (A1), Eisen-Schwefel-Proteine (FeS) und Ferredoxin (Fd). Photosynthetische Elektronentransportkette dient der Konvertierung von Lichtenergie zu Reduktionsenergie (NADPH) und chemischem Energiepotential (ATP) (BUKHOV, 2004; ROCHAIX, 2011; SONNEWALD, 2014) (eigene Abbildung)

Die Lichtenergie wird durch photosynthetisch aktive Pigmente in Antennenkomplexen absorbiert, die strukturell an die Reaktionszentren der Photosysteme angebunden sind. Diese liegen im PSII als Chlorophyll-Proteinkomplexe mit unterschiedlichen Chlorophyll a:b-Verhältnissen (GREEN und DURNFORD, 1996) vor, unterstützt durch Lutein, Neoxanthin und Violaxanthin. β -Carotine sind in den Antennenkomplexen des PSII nicht vorhanden (LAISK et al., 2014). Durch Absorption eines Lichtquantums werden einzelne Elektronen in dem äußersten Orbital der photosynthetisch aktiven Pigmente angeregt und gelangen in das nächstgelegene Orbital. Die angeregten Pigmente im Singulettzustand (Chlorophyll: $^1\text{Chl}^*$) können die Energie auf die Pigmente der Kern-(Core-) Antennen, bestehend aus Chlorophyll a und β -Carotin, übertragen, die die Anregungsenergie zum Reaktionszentrum weiterleiten (GREEN und DURNFORD, 1996; LAISK et al., 2014). Dort kann die Anregungsenergie für die Umwandlung in chemi-

sche Energie genutzt werden (SCHÄFER und SCHMID, 1993; SCHOPFER und BRENNICKE, 2010). Im Reaktionszentrum der Photosysteme befinden sich Phäophytine, Plastoquinone, Nicht-heme-Eisen und β -Carotine (BUKHOV, 2004; GREEN und DURNFORD, 1996; LAISK et al., 2014; ROCHAIX, 2011; SONNEWALD, 2014), sowie photochemisch aktive Chlorophylle (P680), die nur selten direkt an der Lichtabsorption beteiligt sind, sondern durch die weitergeleitete Energie angeregt werden und durch die Abgabe eines Elektrons an das Phäophytin die Elektronentransportkette initiieren. Die entstandene Elektronenlücke wird durch Oxidation von Wasser unter Entstehung von O_2 geschlossen (NELSON und YOCUM, 2006).

Über Cytochrome und Plastocyanine werden die Elektronen vom Phäophytin an das PSI weitergeleitet. Dieses unterscheidet sich im Aufbau und der Zusammensetzung vom PSII. Im PSI sind das Reaktionszentrum und die Kernantennen in einem einzigen Chlorophyll-Protein-Komplex kombiniert, bezeichnet als Core-Komplex (GREEN und DURNFORD, 1996). Neben Chlorophyll a (P700) (LAISK et al., 2014) enthält der Core-Komplex β -Carotine, Phylloquinone und 3 Fe_4-S_4 -Cluster (BUSCH und HIPPLER, 2011; GREEN und DURNFORD, 1996; NELSON und YOCUM, 2006). Die Antennenkomplexe des PSI enthalten deutlich mehr Chlorophyll a-Moleküle als die Antennenkomplexe des PSII (CROCE und VAN AMERONGEN, 2013) und entsprechend weniger Chlorophyll b (LAISK et al., 2014). Im Unterschied zu den Antennenkomplexen des PSII beinhalten die Antennenkomplexe des PSI neben Lutein und Violaxanthin auch β -Carotine. Neoxanthine sind hingegen nicht vorhanden (CROCE und VAN AMERONGEN, 2013; LAISK et al., 2014).

Über Phylloquinone und Eisen-Schwefel-Proteine wird das Elektron an Ferredoxin weitergeleitet, welches als Elektronendonator bei der Reduktion von $NADP^+$ fungiert. Der Protonengradient, der gegen den der Elektronentransport angetrieben wird, kann für die ATP-Synthese genutzt werden (BUKHOV, 2004; ROCHAIX, 2011; SONNEWALD, 2014). Die generierten energiereichen Verbindungen ATP und NADPH werden anschließend in enzymatisch katalysierten Reaktionen für den Einbau von anorganischen Kohlenstoff in organische Substanzen verwendet (ROCHAIX, 2011). Dieser Abschnitt wird häufig als Dunkelreaktion bezeichnet, jedoch sind die Aktivitäten einiger beteiligter Enzyme lichtreguliert (BUKHOV, 2004). Ferredoxin dient zudem als Elektronenspender für Schwefel- und Stickstoffassimilationen und Thioredoxine, welche die Kohlenstoffassimilation regulieren. Neben der linearen Elektronentransportkette kann das reduzierte Ferredoxin seine Elektronen zurück auf das Plastoquinon oder den Cytochromkomplex übertragen. Dieser zyklische Elektronentransport ist verbunden mit einer Protonentranslokalisierung und ATP-Synthese (ROCHAIX, 2011). Der Prozess ist von Bedeutung unter Stressbedingungen, ausgelöst durch hohe Lichtintensitäten, Trockenheit und extreme Temperaturen mit dem Ziel, ATP zu generieren und einen hohen pH-Gradienten zu schaffen, der durch die Aktivierung einiger Enzyme wichtig für das nicht-photochemische Quenching ist (JOHNSON, 2011).

Mit welcher Effizienz das Licht für die Kohlenstofffixierung genutzt wird ist abhängig von der artspezifischen Quantenausbeutekurve, die jedoch meist einen ähnlichen Verlauf zeigt (McCree, 1971). Die

höchste Photosyntheseleistung kann durch die Absorption von rotem Licht erreicht werden (EVANS, 1987; MCCREE, 1971). Dabei spielen verschiedene Faktoren eine Rolle:

- (1) Grundvoraussetzung für die Nutzung bestimmter Lichtquanten ist die Absorption durch photosynthetisch aktive Pigmente, die spezifische Absorptionsspektren aufweisen (Abbildung 2.14). Chlorophylle haben ihr Absorptionsmaximum im blauen und roten Bereich, Carotinoide im blauen und kurzwelligen Grünlichtbereich. Der Energiegehalt der Photonen hat keinen Einfluss auf die Quantenausbeute. Zwar haben Photonen mit kürzeren Wellenlängen des blauen Spektralbereichs einen 75% höheren Energiegehalt als Photonen des roten Spektralbereichs, benötigt wird jedoch lediglich die Energie eines roten Photons (ZHU et al., 2008b).

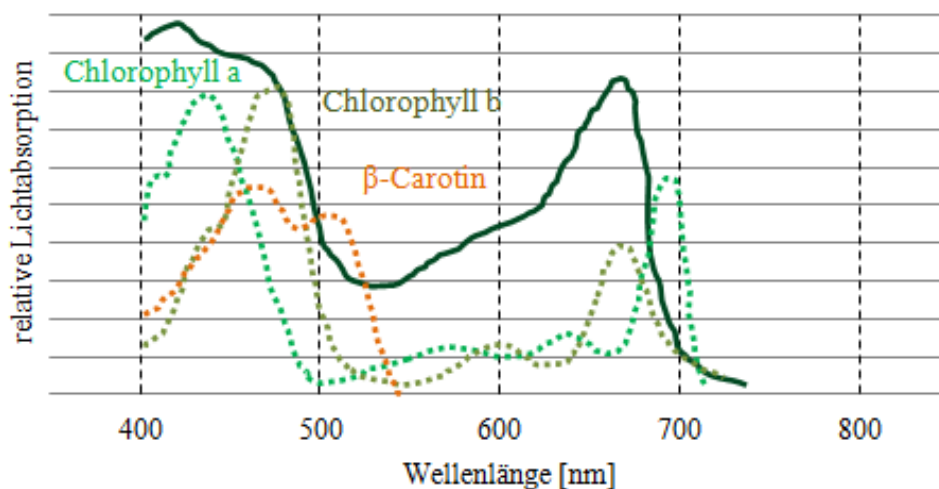


Abbildung 2.14: Absorptionsspektren photosynthetisch wirksame Pigmente, adaptiert von RUNGRAT et al., 2016; gestrichelte orange Linie: β -Carotin, grün: Chlorophyll a, olivgrün: Chlorophyll b; durchgezogene grüne Linie: Absorptionsspektrum aller photosynthetisch aktiven Pigmente

- (2) Durch unterschiedliche Protein- und Pigmentzusammensetzungen verfügen die Lichtsammelkomplexe von PSII und PSI über verschiedene Absorptionseigenschaften (ROCHAIX, 2011). Im grünen und roten Spektralbereich ist die Absorption durch das PSII deutlich höher, ab ca. 690 nm werden die Photonen hingegen fast vollständig durch das PSI absorbiert (LAISK et al., 2014). Die unterschiedlichen Absorptionseigenschaften und die Verknüpfung beider Photosysteme über die Elektronentransportkette bewirken den Emerson-Effekt (MYERS und FRENCH, 1960). Ungleichgewichte bei der Anregung beider Photosysteme führen entsprechend zu einer Reduktion der Quantenausbeute (HOGEWONING et al., 2012; PFANNSCHMIDT, 2005).
- (3) Die Weiterleitung der absorbierten Photonen von den Antennenpigmenten zum Reaktionszentrum erfolgt mit einer unterschiedlich hohen Effizienz: Zwischen Chlorophyllen liegt diese bei etwa 100%, ist jedoch bei einem Energietransfer von Carotinoiden zu Chl a reduziert. Als Folge geht zwischen 450-500 nm die photosynthetische Aktivität auf etwa 70% zurück, obgleich Carotinoide vorhanden sind, die in diesem Bereich absorbieren (Abbildung 2.14) (LAISK et al., 2014).

- (4) Im blauen Spektralbereich werden Photonen zudem durch nicht-photosynthetisch aktive Pigmente absorbiert, wodurch deren Verfügbarkeit für die Photosynthese reduziert wird (LAISK et al., 2014).

Für eine optimale Nutzung der Lichtenergie reagiert der Photosyntheseapparat auf Veränderungen der Lichtintensität und -qualität. Langzeitreaktionen, auch als Akklimatisierung oder Adaption bekannt, bezeichnen Veränderungen, die viele Stunden oder Tage andauern, und verbunden sind mit einer veränderten Genexpression. Dadurch werden Blattstruktur, Gehalt und qualitative Zusammensetzung von Chlorophyllen und Carotinoiden, sowie die relative Anzahl von Reaktionszentren der beiden Photosysteme und die Größe der photosynthetischen Antennen verändert. Kurzzeitige Veränderungen beziehen sich hingegen auf wechselnde Bewölkung oder Sonnenflecken, die teilweise nur Sekunden andauern (BUKHOV, 2004; EBERHARD et al., 2008). Schattierungsbedingte Steigerungen des Fernrotanteils können zu einem erhöhten PSI:PSII-Verhältnis führen (BAILEY et al., 2001; HOGEWONING et al., 2012; JOHNSON, 2011), da sich in den Lichtsammelkomplexen des PSI Chlorophylle befinden, deren Absorptionsspektren in den längerwelligen Rotlichtbereich (735 nm) verschoben sind (BUSCH und HIPPLER, 2011). Hohe PAR-Werte erhöhen hingegen die Gefahr einer ungleichmäßigen Anregung beider Photosysteme (DIETZEL et al., 2011). Dadurch wandert ein Teil der Antennenkomplexe des PSII reversibel zum PSI, um dessen Antennengröße zu vergrößern (GREEN und DURNFORD, 1996; LEMEILLE und ROCHAIX, 2010). Die entstandenen Superkomplexe können kurzfristig (CROCE und VAN AMERONGEN, 2013) und langfristig (WIENTJES et al., 2013) ein Anregungsgleichgewicht zwischen den beiden Photosystemen bewirken.

2.2.2 Lichtabhängige Entwicklungsprozesse: Photorezeptoren und Signalkaskaden

Neben Anpassungen des Photosyntheseapparats bewirken die Lichtbedingungen auch Veränderungen des Wachstums und der Entwicklung, eingeleitet durch ein komplexes und differenziertes Netzwerk aus Photorezeptoren und nachgeschalteten Regulatoren. Photorezeptoren erfassen das Licht über dessen Richtung, Dauer, Intensität und spektrale Zusammensetzung (BATSCHAUER, 1999). Nach Absorption bestimmter Lichtquanten werden differenzierte Reaktionen durch Phytochrome (Pr bzw. Pfr), Cryptochrome (Cry) und Phototropine (Phot) (Abbildung 2.15) gesteuert, die unter anderem beteiligt sind an der Regulation von Samenkeimung, Keimlingsphotomorphogenese, Phototropismus, Gravitropismus, Chloroplastenbewegung, Schattenvermeidung, zirkadianen Rhythmus und Blüteninduktion (JIAO et al., 2007). Drei pflanzenspezifische Proteine: ZTL (Zeitlupe), FKF1 (Flavin-binding Kelch repeat F-box1) und LKP2 (LOV Kelch Protein 2) sind als Blaulichtrezeptoren wichtig für die Regulierung des Tagesrhythmus und der photoperiodischen Blüte (ITO et al., 2012). Für die Absorption von UV-Licht gibt es zudem noch den UV-Lichtrezeptor UVR8 (CASAL, 2013), der durch Regulierung von Gentranskriptionen insbesondere Photomorphogenese und Flavonoidbiosynthese beeinflusst (CHRISTIE et al., 2012; JENKINS, 2014; RIZZINI et al., 2011).

2.2.2.1 Photorezeptoren

Bei Photorezeptoren handelt es sich strukturell um Chromoproteine (JIAO et al., 2007) mit Chromophoren am N-terminalen Bereich, die das Licht absorbieren und dadurch eine Konformationsänderung des C-terminalen Apoproteins einleiten. Die aktiven Photorezeptoren vermitteln eine Signalübertragung, an der verschiedene negative und positive Regulatoren beteiligt sind und u.a. Genexpressionen reguliert werden (GYULA et al., 2003).

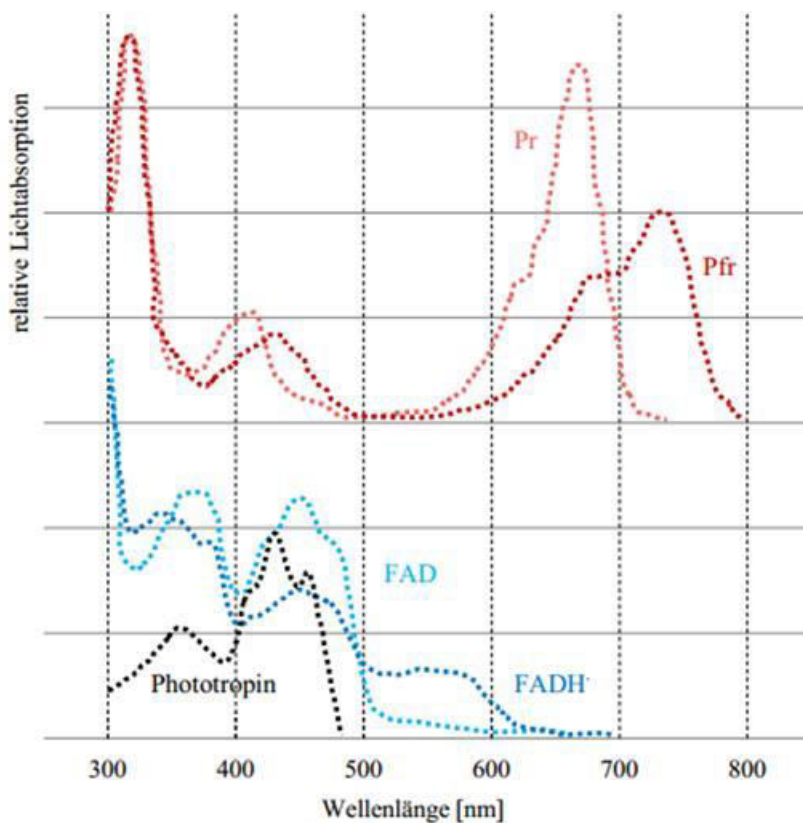


Abbildung 2.15: Absorptionsspektren wichtiger Photorezeptoren: Absorptionsspektren FAD und FADH \cdot nach KOTTKE et al. (2017), Absorptionsspektren Pr und Pfr nach LI et al. (2011), Absorptionsspektrum Phototropin nach BRIGGS und CHRISTIE (2002)

Die vermutlich einzigen Photorezeptoren, die im roten und fernroten Spektralbereich absorbieren, sind die **Phytochrome**. Diese umfassen eine Familie meist photoreversibler dimerer Chromoproteine, die zudem in einem geringen Maße Blau- (BATSCHAUER, 1999) und Grünlicht (SHINOMURA et al., 1996) absorbieren (Abbildung 2.15). Unterschieden werden in *Arabidopsis thaliana* fünf Phytochrome (PhyA-PhyE), von denen PhyB als primärer Rezeptor für rotes Licht (BALLARÉ und PIERIK, 2017; VICZIÁN et al., 2017), PhyA für den fernroten Spektralbereich gilt (TEPPERMAN et al., 2001). Der, am photosensorisch aktiven N-terminalen Bereich kovalent gebundene, Bilin Chromophor (PΦB) verändert bei Absorption von rotem Licht (Absorptionsmaximum: 660 nm) seine Konformation, wodurch eine Strukturänderung des Apoproteins veranlasst wird und die Phytochrome in ihre aktive Form (Absorptionsmaximum: 730 nm) übergehen (LI et al., 2011a). Für die Weiterleitung des Lichtsignals ist der C-terminale Bereich verantwortlich, der Dimerisationen und lichtabhängige Kernlokalisierungen reguliert (JIAO et al., 2007). Dabei gelangen die Phytochrome vom Cytoplasma in den Nukleus (QUAIL, 2002). Die Translokalisierung benötigt bei PhyB mehrere Stunden (GENOUD et al., 2008b; KIRCHER et al., 2002) und

geschieht bei PhyA innerhalb weniger Minuten, beschleunigt vermutlich durch die Pflanzenspezifische Proteine FHY1 (=FAR-RED ELONGATED HYPOCOTYL 1) und FHL (=FHY-1 LIKE). Die Signalvermittlung beruht vermutlich auf einer Histidin-Kinase-Aktivität mit Serin/ Threoninspezifität, resultierend in einer Modulierung der Transkription von zahlreichen Genen, die die Pflanzenphotomorphogenese steuern (BAUER et al., 2004; YEH und LAGARIAS, 1998).

Durch Absorption von fernrotem Licht (Absorptionsmaximum: 730 nm) gelangen die Phytochrome zurück in ihren inaktiven Zustand und steuern durch diese Eigenschaft Reaktionen auf unterschiedliche R:FR-Verhältnisse. Eine Verringerung des R:FR-Verhältnisses ist für Pflanzen ein wichtiger Indikator für das Wachstumsumfeld, die Tages- und Jahreszeit (siehe Abschnitt 2.1.1). Die R:FR-Photoreversibilität gilt nicht für PhyA-vermittelte Reaktionen, zu denen „VLF-Responses“ (very low fluence responses), initiiert bereits durch wenige Sekunden Sternenlicht mit einem Sättigungspunkt bei $1 \mu\text{mol m}^{-2}$, und „HI-Responses“ (far-red high irradiance responses), induziert vorwiegend durch kontinuierliche Bestrahlungen mit fernrotem Licht, zählen. Auch PhyB-PhyE vermitteln R:FR-reversible Reaktionen, die als „R-HIR“- und „LFR“ (low fluence response) -Reaktionen auf kontinuierliches Rotlicht definiert werden (BATSCHAUER, 1999; BAUER et al., 2004). Die Reversion kann zusätzlich durch steigende Temperaturen gesteuert werden (JUNG et al., 2016; LEGRIS et al., 2016).

Die einzelnen Phytochrome haben teils spezifische, teils überlappende Funktionen in der Pflanze. PhyA ist in *Arabidopsis* für die fernrot-vermittelte Keimung (SHINOMURA et al., 1996), den circadianen Rhythmus (SOMERS et al., 1998) und Hypocotylwachstumshemmungsreaktionen (NAGATANI et al., 1993; WHITELAM et al., 1993) verantwortlich. PhyB reguliert hingegen die rotlichtinduzierte Keimung (SHINOMURA et al., 1996, 1994) und Hypocotylwachstumshemmung (NAGATANI et al., 1993; PARKS und QUAIL, 1993), sowie die rotlichtabhängige Verzögerung des Blütenbeginns (GUO et al., 1998; LAZARO et al., 2015). Beide Phytochrome werden mit einer Erhöhung der lichtregulierten Expression der Phytoenesynthase in Zusammenhang gebracht (VON LINTIG et al., 1997). Das Blattwachstum in *Arabidopsis* wird auf PhyC-vermittelte Reaktionen zurückgeführt (QIN et al., 1997). Antagonistische Wirkungen der verschiedenen Phytochrome sind bei der De-Etiolation zu beobachten. Diese wird bei kontinuierlicher Fernrotbestrahlung durch PhyA induziert, bei kontinuierlichem Rotlicht jedoch durch PhyB unterdrückt (LI et al., 2011a; QUAIL et al., 1995). PhyA und PhyB fördern die lichtinduzierte Stomataöffnung als Reaktion auf Rot-, Blau- (WANG et al., 2010) und Grünlicht (TALBOTT et al., 2002b), wobei höhere PAR-Werte erforderlich sind als bei blaulichtinduzierten Regulationen durch Cryptochrome und Phototropine. Hohe Rotlicht-PAR-Werte können die Stomataöffnung hemmen (KINOSHITA et al., 2001; SHIMAZAKI et al., 2007).

Cryptochrome und **Phototropine** absorbieren ausschließlich kurzwellige UV-A- und Blaulichtbereiche. Das Aktionsspektrum der Cryptochrome hat sein Maximum zwischen 380-500 nm, mit geringen Aktivitäten bei kürzeren Wellenlängen $> 365 \text{ nm}$ und höheren Wellenlängen $< 550 \text{ nm}$ (AHMAD et al., 2002; LIN et al., 1995). Strukturell gehören Cryptochrome zu den Photolyase-ähnlichen Flavoproteinen, von

denen in *A. thaliana* zwei bekannt sind: Cry1 und Cry2 (LIN und SHALITIN, 2003). An ihrem N-terminalen, Photolyase-ähnlichen (PHR) Bereich binden Cryptochrome nicht-kovalent zwei Chromophore: ein Flavin-Adenin-Dinukleotid (FAD) mit katalytischer Funktion und ein Pterin oder Deazaflavin, das als Lichtsammelantenne fungiert. Das Lichtsammelantennenchromophor absorbiert blaues Licht und induziert einen intramolekularen Elektronentransport, durch den das FAD zum stabilen, neutralen Semichinon FADH^\bullet reduziert wird (BANERJEE et al., 2007; BOULY et al., 2007; LIN und SHALITIN, 2003; LISCUM et al., 2003; SHALITIN et al., 2002). Vermutlich werden dadurch Konformationsänderungen des C-terminalen DAS-Bereichs (CCT) induziert (BANERJEE et al., 2007; BOULY et al., 2007; LIN und SHALITIN, 2003; LISCUM et al., 2003; SHALITIN et al., 2002) und eine Weitervermittlung der Informationen zu nachgelagerten Signalpartnern ermöglicht (LISCUM et al., 2003).

Auch bei den Cryptochromen wird eine Photoreversibilität vermutet (Abbildung 2.16). Durch grünes Licht können die Flavinsemiquinone in ihre inaktive Form überführt werden (BOULY et al., 2007). Deswegen gelten Cryptochrome nicht nur als Sensoren für die Blaulichtbestrahlungsstärke, sondern auch für das B:G-Verhältnis des Lichtes (SELLARO et al., 2010).

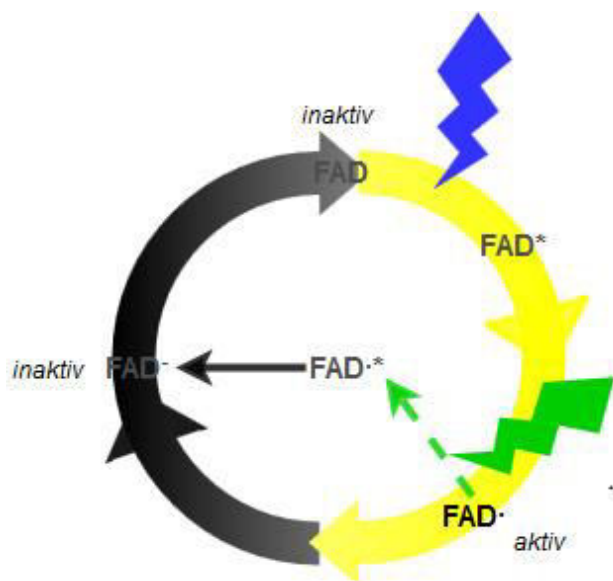


Abbildung 2.16: Cryptochrome Photozyklus; FAD (inaktiv) wird blaulichtinduziert reduziert zu dem signalübermittelnden FADH^\bullet mit dem kurzlebigen FAD^\bullet als Zwischenstufe; durch Grünlicht wird FADH^\bullet reduziert zum inaktiven FADH^\bullet mit dem kurzlebigen FADH^\bullet als Zwischenstufe; in Dunkelheit kommt es zur Akkumulation der inaktiven Formen FAD und FADH^\bullet ; eigene Abbildung mit Angaben von BOULY et al. (2007).

Durch ihre spektralbereichsspezifische Aktivität gelten Cryptochrome als Sensor junger Pflanzen beim Durchbrechen der Bodenoberfläche und für die Schattenbildung durch benachbarte Pflanzen. Cryptochrome vermittelt kommt es zur De-Etiolierung einschließlich Hypokotylwachstumshemmung (AHMAD und CASHMORE, 1997, 1993; CHATTERJEE et al., 2006; GUO et al., 1999; LIN und SHALITIN, 2003; NINU et al., 1999). Die Cry1-vermittelte Hypokotylwachstumshemmung wird verstärkt durch PhyA und PhyB (AHMAD und CASHMORE, 1997). Beide Cryptochrome sind thermoresistent und regulieren das Hypocotylwachstums auch bei hohen Temperaturen (AHMAD et al., 2002; MA et al., 2016). Cry2 wirkt weiterhin bei der Regulation der photoperiodischen Blüte und des zirkanen Rhythmus (GUO et al., 1998), während Cry1 die Blüte etwas verzögern kann (PLATTEN et al., 2005). Beteiligt an der cryptochromeinduzierten Signalvermittlung ist die Calciumkonzentration im Cytosol, durch die u. a. die

Genexpression der CHS und PAL reguliert werden (CHRISTIE und JENKINS, 1996; GUO et al., 2001), resultierend in einer Steigerung der Anthocyansynthese (AHMAD und CASHMORE, 1997; CHATTERJEE et al., 2006; MANCINELLI et al., 1991; NINU et al., 1999; SPONGA et al., 1986) und verstärkt durch PhyA und PhyB (AHMAD und CASHMORE, 1997). Wie auch die Phytochrome fördern Cryptochrome die Stomataöffnung (MAO et al., 2005; TALBOTT et al., 2002a), wobei diesbezüglich eine Grünlichtreversibilität nachgewiesen wurde (FRECHILLA et al., 2000; TALBOTT et al., 2002a; TALBOTT et al., 2002b). Während die phototropininduzierte Stomataöffnung bereits bei geringen Blaulichtbestrahlungsstärken stattfindet, wirken Cryptochrome bei höheren Bestrahlungsstärken (KINOSHITA et al., 2001).

Die pflanzenspezifischen Blaulichtrezeptoren **Phototropine** (bekannt in *A. thaliana*: Phot1 und Phot2) verfügen am photosensorisches N-terminales Ende über zwei LOV („light, oxygen, or voltage“-sensorischen)- Bereiche, die jeweils ein Flavin Mononukleotid (FMN) als UVA-/ blaulichtabsorbierendes Chromophor binden (CHRISTIE et al., 1999; PETERSEN et al., 2017). Blaulichtinduziert kommt es zu einer kovalenten Bindung der Flavin Mononukleotide an die LOV-Bereiche (FUJII et al., 2017), resultierend in einer Aktivierung der Serin/ Threoninkinase-Funktion am C-terminalen Bereich (OKAJIMA et al., 2012, 2011). Die Kinaseaktivität leitet durch eine Autophosphorylierung die Übermittlung des Lichtsignals ein (CHALMERS et al., 1997; INOUE et al., 2008; JIAO et al., 2007; KAGAWA et al., 2001). Dephosphorylierungen (TSENG und BRIGGS, 2010) und Temperaturanstiege (FUJII et al., 2017) können die Signalübermittlung stoppen. Während Phot1 auf geringe Blaulicht-PAR-Werte ($> 0,1 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) reagiert, reguliert Phot2 die blaulichtinduzierten Reaktionen bei stärkerer Bestrahlung ($> 1 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) (KAGAWA et al., 2001; OKAJIMA et al., 2012; SAKAI et al., 2001; TAKEMIYA et al., 2005). Neben dem namensgebenden Phototropismus, der Chloroplastenbewegung, dem Blattwachstum und der Stomataöffnung (INOUE et al., 2008; KAGAWA et al., 2001; SAKAI et al., 2001; TAKEMIYA et al., 2005), dient die phototropinvermittelte Signalübertragung der Optimierung der Photosynthese bezüglich einer effizienten Nutzung der Lichtenergie, einer optimalen CO_2 -Versorgung und einer Reduktion lichtinduzierter Schädigungen (TAKEMIYA et al., 2005). Während bei geringen Bestrahlungsstärken Wurzel- und Hypokotyl-Phototropismus und Chloroplastenakkumulation initiiert werden (KAGAWA et al., 2001; LISCUM und BRIGGS, 1995), wird bei hohen PAR-Werten der Phototropismus gehemmt (SCHUMACHER et al., 2018) und die Lichtabsorption durch Chloroplastenbewegungen verringert (KAGAWA et al., 2001). Ähnliche Chloroplastenbewegungen wurden bei Kälte beobachtet und deuten eine Thermoreversibilität der Phototropine an (FUJII et al., 2017).

2.2.2.2 Nachgeschaltete Regulatoren und Transkriptionsfaktoren

Die von Photorezeptoren aufgenommenen Lichtsignale werden über nachgeschaltete Signalkaskaden weitergeleitet und resultieren in veränderten Genexpressionen und Modulation biologischer Reaktionen (Abbildung 2.17). Das Netzwerk hinter den lichtinduzierten Reaktionen ist komplex und umfasst eine beträchtliche Anzahl an positiven und negativen Regulatoren (LI et al., 2011a), die meist mit ähnlichen

Funktionen in mehreren Netzwerken involviert sind. Andere Regulatoren lassen sich nicht eindeutig als negative oder positive Regulatoren der Photomorphogenese einstufen, unter anderem **HRBI** (KANG et al., 2007; KANG et al., 2005b; SUN et al., 2012b), **GBF1** (G-BOX-BINDING FACTOR 1) (MALLAPPA ET AL., 2006), **SHB1** (=SHORT HYPOCOTYL UNDER BLUE1) (KANG und NI, 2006; ZHOU und NI, 2009) und **ELF3** (EARLY FLOWERING3) (HUBBARD und WEBB, 2011; KINOSHITA et al., 2011; LIU et al., 2007).

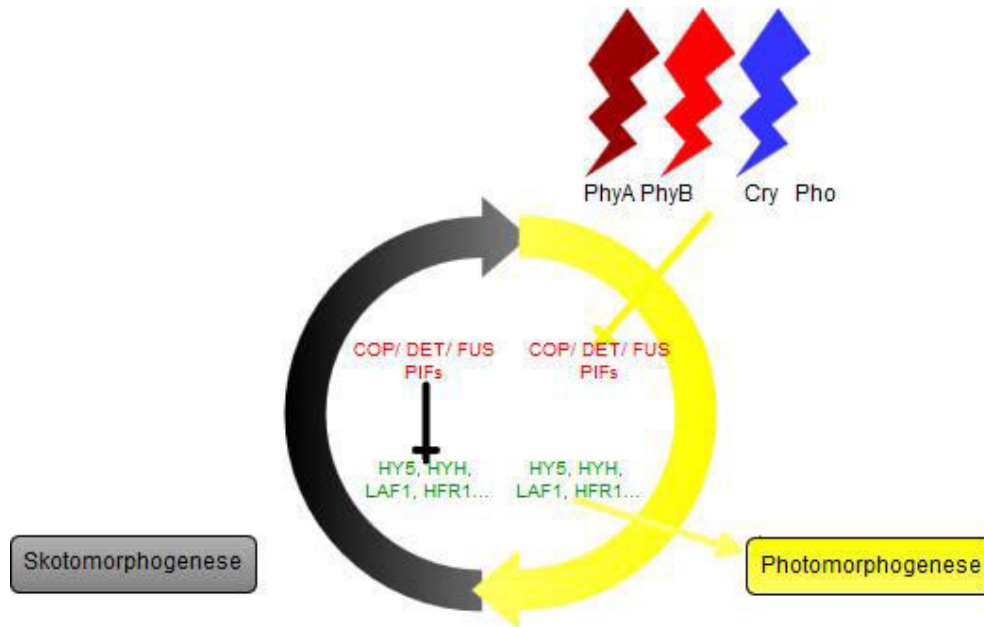


Abbildung 2.17: Schematische Darstellung des lichtinduzierten Netzwerks. Eine lichtabhängige Aktivierung der Photorezeptoren ermöglicht eine Interaktion mit negativen Regulatoren, die dadurch inaktiviert werden (COP= CONSTITUTIVE PHOTOMORPHOGENIC 1, DET= DE-ETIOLATED, FUS= FUSCA, PIF=PHYTOCHROME INTERACTING FACTORS). Dies steigert die Aktivität der positiven Regulatoren der Photomorphogenese (HY5= ELONGATED HYPOCOTYL5, HYH= HY5 HOMOLOG, LAF1= LONG AFTER FAR-RED LIGHT 1, HFR1= LONG HYPOCOTYL IN FAR-RED 1) (BROWN und JENKINS, 2008; GANGAPPA und BOTTO, 2016; HEIJDE und ULM, 2012; LAU und DENG, 2012a; Li et al., 2011a); eigene Abbildung

Als Schlüsselregulator lichtinduzierter Prozesse gilt **HY5** (BAUER et al., 2004; COPE und DESHAIES, 2003; HARDTKE et al., 2000; JIAO et al., 2007; Li et al., 2011a), ein bZIP (basic leucine zipper) Transkriptionsfaktor (GANGAPPA und BOTTO, 2016; JACOBY et al., 2002) mit zwei Isoformen. Die unphosphorylierte Form ist physiologisch aktiver, weist jedoch eine geringere Stabilität auf. Das weniger aktive, jedoch stabilere phosphorylierte HY5 dient möglicherweise als Reserve für eine schnellere HY5-Akkumulation bei Lichtexposition (BAUER et al., 2004; HARDTKE et al., 2000). Als photomorphogenesefördernder Transkriptionsfaktor ist HY5 Bestandteil Phytochrome-, Cryptochrome- und UVR-8-induzierter Signalkaskaden (BROWN und JENKINS, 2008; HEIJDE und ULM, 2012; LAU und DENG, 2012). Die Photorezeptoren reduzieren bei Lichtexposition die Inaktivierung von HY5 durch COP1 und anderer negative Regulatoren (GANGAPPA und BOTTO, 2016) und wirken einer Ubiquitination und Degradation des HY5 entgegen (OSTERLUND et al., 2000; SAIJO et al., 2003). Geringe Temperaturen fördern die

HY5-Akkumulation (CATALA et al., 2011; ZHANG et al., 2011c) bei gleichzeitiger Hemmung des COP1-vermittelten HY5-Abbaus (CATALA et al., 2011). Hohe Temperaturen führen zu einem Absenken des HY5-Levels (TOLEDO-ORTIZ et al., 2014).

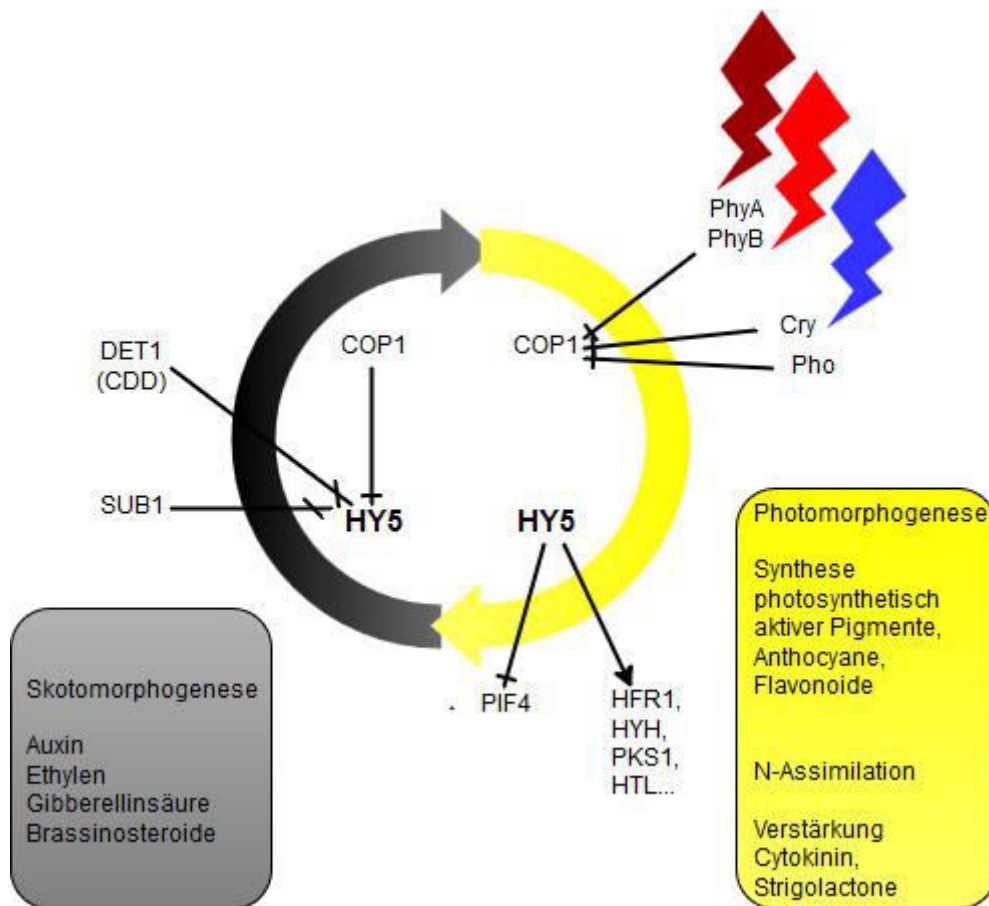


Abbildung 2.18: Einbindung des ELONGATED HYPOCOTYL 5 (HY5) in die photorezeptorvermittelte Regulation von Photomorphogenese, Hormonsignalübertragung, N-Assimilation und Pigmentsynthese (CATALA et al., 2011; CHEN et al., 2016; DELKER et al., 2014; GANGAPPA und BOTTO, 2016; HOLM et al., 2002; JANG et al., 2013; JONASSEN et al., 2008; LAU und DENG, 2012; LEE et al., 2007; LI et al., 2011a; MARTÍNEZ-GARCÍA et al., 2000; SAIJO et al., 2003; SHI et al., 2011; SHIN et al., 2013; SHIN et al., 2007a; SIBOUT et al., 2006; SRIVASTAVA et al., 2015; STRACKE et al., 2010; SUN und NI, 2011; TOH et al., 2012; TOLEDO-ORTIZ et al., 2014; YANAGISAWA, 2014; ZHANG et al., 2016; ZHANG et al., 2011c; ZHU et al., 2008a); eigene Abbildung

Als Transkriptionsfaktor beeinflusst HY5 die Expression einer Vielzahl an Genen (LEE et al., 2007; ZHANG et al., 2011a) und wird aufgrund seiner vielfältigen Funktionen als Schlüsselpunkt der lichtinduzierten Signalübermittlung angesehen (Abbildung 2.18):

- Beeinflussung der Regulatoren der Blüteninduktion sowie des circadianen Rhythmus (ANDRONIS et al., 2008; LEE et al., 2007)
- Aktivitätserhöhung anderer positiver Regulatoren (HOLM et al., 2002; JANG et al., 2013; LEE et al., 2007; SUN und NI, 2011)
- Beeinflussung der Genexpression verschiedener Enzyme, die an Carotinoid- (TOLEDO-ORTIZ et al., 2014, 2010) und Flavonoidsynthese (CATALA et al., 2011; MARTÍNEZ-GARCÍA et al., 2000; SHIN et

al., 2013; SHIN et al., 2007a; STRACKE et al., 2010; SUN und NI, 2011; ZHANG et al., 2016; ZHANG et al., 2011c) beteiligt sind

- Inhibitor der PIF4 Genexpression (DELKER et al., 2014; LEE et al., 2007)
- Negativer Regulator von Auxin (SIBOUT et al., 2006), Gibberellinsäure (LEE et al., 2007), Brassinosteroiden (SHI et al., 2011) und Ethylen (LI et al., 2011c)
- Synergistische Wirkungen mit Cytokinin und Strigolactonen (JIA et al., 2014; TOH et al., 2012; TSUCHIYA et al., 2010; VANDENBUSSCHE et al., 2007)
- Aktivierung der Nitrataassimilation und Photosynthese in Abhängigkeit vom verfügbaren Licht (YANAGISAWA, 2014) durch phytochromevermittelte Förderung der Genexpression der Nitratreduktase unter fernrotem Licht (JONASSEN et al., 2008), Hemmung der Genexpression eines Ammoniumtransporters und Beeinflussung des Wurzelwachstums und der Stickstoffaufnahme durch Aktivierung der Genexpression eines Nitrattransporters (CHEN et al., 2016)

Ein weiterer bekannter positiver Regulator der Photomorphogenese ist **HYH**, dessen Akkumulation durch HY5 (HOLM ET AL., 2002; ZHANG ET AL., 2017), niedrige Temperaturen (ZHANG et al., 2011c) und Blaulicht gefördert wird (HOLM et al., 2002). HYH ist an der Hypokotylwachstumshemmung, Samenkeimung, Blüteninduktion (HOLM et al., 2002; SHI et al., 2011), Expression der Nitratreduktase (JONASSEN et al., 2008), Anthocyanakkumulation (HOLM ET AL., 2002; ZHANG et al., 2011c) und, als negativer Regulator, an der Regulation des Brassinosteroid-Signalweges (SHI et al., 2011) beteiligt. Wie auch HY5 interagiert HYH mit COP1 resultierend in einer dunkelspezifischen Degradation von HYH (HOLM et al., 2002). **MYB**-Proteine, Mitglieder eine Transkriptionsfaktor-Genfamilie, sind involviert in cryptochrome- (HONG et al., 2008), phototropin- (COMINELLI et al., 2005) und phytochromevermittelte Signalkaskaden (KUNO, 2003). Die MYB-Proteine sind Regulatoren des circadianen Rhythmus (KUNO, 2003; LAU et al., 2011), der Wurzelentwicklung (FENG et al., 2004; MU et al., 2009; SHIN et al., 2007b), des Phenylpropanoidstoffwechsels (BOREVITZ et al., 2000), einschließlich Flavonoid- und Anthocyan-synthese (BOREVITZ et al., 2000; HONG et al., 2008; KOBAYASHI et al., 2002; LAI et al., 2015; LI et al., 2012c; NIU et al., 2010) sowie beteiligt an Hormonsignalkaskaden während Samenentwicklung und –keimung, vermittelt durch Gibberellinsäure (GOCAL et al., 2001), Abscisinsäure (SHINOZAKI et al., 1992) und Jasmoninsäure (SONG et al., 2011). Wie auch andere positive Regulatoren werden MYB-Proteine in Dunkelheit durch COP1 gebunden und degradiert (HONG et al., 2008; LI et al., 2012c). **HFR1**, Bestandteil blau- und rotlichtinduzierter Signalkaskaden (DUEK und FANKHAUSER, 2003; ZHANG et al., 2008), unterdrückt hingegen durch Rotlicht (FAIRCHILD et al., 2000), beeinflusst De-Etiolierung, einschließlich Hemmung der Hypokotylwachstums, Kotyledonöffnung und die Anthocyanakkumulation bei Blaulicht (DUEK und FANKHAUSER, 2003). Durch eine Bindung von PIF1 unterdrückt HFR1 dessen transkriptionale Aktivität und verhindert dadurch eine Unterdrückung der Samenkeimung (SHI et al., 2013). Bei geringen R:FR-Verhältnissen reguliert HFR1 über das Auxinlevel die Schattenvermeidungsreaktionen (HERSCH et al., 2014). Als weitere positive Regulatoren wurden **PKS4** (SCHUMACHER et al., 2018) und **PP7** identifiziert (MOLLER et al., 2003), die Bestandteile phototropin-

(SCHUMACHER et al., 2018) bzw. cryptochrome- und phytochromevermittelter Signalkaskaden sind (GENOUD et al., 2008a; SUN et al., 2012b).

Zu den wichtigsten Repressoren, die die Lichtsignalvermittlung in Dunkelheit verhindern, gehören die PIFs (=PHYTOCHROME-INTERACTING-FACTORS) (MA et al., 2016; PAIK et al., 2017) und COP/DET/FUS-Proteine (CONSTITUTIVE PHOTOMORPHOGENIC/DE-ETIOLATED/FUSCA) (HOECKER, 2017). Während die PI-Faktoren als Transkriptionsfaktoren die Genexpression direkt beeinflussen, wirken die COP/DET/FUS-Proteine durch die Ubiquitinierung positiver Regulatoren.

PI-Faktoren haben eine photomorphogenesehemmende Funktion (LI et al., 2011a), und wurden zunächst in phytochromevermittelten Signalkaskaden identifiziert (PAIK et al., 2017). Mittlerweile ist jedoch auch eine Beteiligung an cryptochromevermittelten Signalwegen belegt (MA et al., 2016). Die Aktivität der PIFs unterliegt dem circadianen Rhythmus (Abbildung 2.19) mit hohen Aktivitäten in der Dunkelheit, wodurch diese eine zentrale Funktion bei skotomorphogeneseassoziierten Genexpressionen haben (AL-SADY et al., 2006; PHEE et al., 2008).

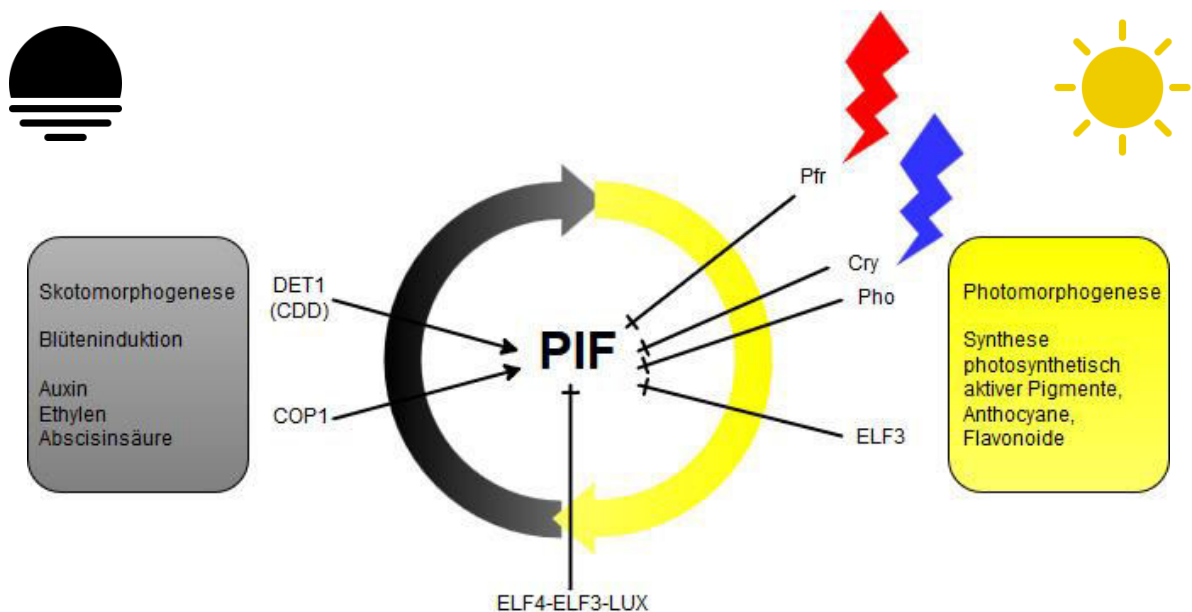


Abbildung 2.19: Einbindung der Phytochrome-Interacting-Factors (PIF) in die photorezeptorvermittelte Regulation von Photomorphogenese, Hormonsignalübertragung und Pigmentsynthese: Bei Belichtung werden die PIFs photorezeptorvermittelt durch Phosphorylierung inaktiviert (AL-SADY et al., 2006; LEIVAR und QUAIL, 2011; PHEE et al., 2008). In den Abendstunden wird die Expression von PIF4 und PIF5 durch den ELF4-ELF3-LUX-Komplex (EARLY FLOWERING 4, EARLY FLOWERING 3 und LUX ARRHYTHMO) unterdrückt. Durch längere Dunkelperioden, unterstützt durch DET1 (DONG et al., 2014) und COP1 (BAUER et al., 2004) kommt es zu einer Reakkumulation der PIFs, die ihr Aktivitätsmaximum in den Morgenstunden haben (NUSINOW et al., 2012).

Die aktuell beschriebenen acht PIFs (PIF1-PIF8) in Arabidopsis (LEE und CHOI, 2017) sind beteiligt an der Regulierung des Wechsels von Skotomorphogenese zu Photomorphogenese als Reaktion auf Dunkel zu Lichtübergängen (AL-SADY et al., 2006; BAUER et al., 2004; LI et al., 2011a; PHEE et al., 2008). Die Wirkung beruht auf einer Beeinflussung der Genexpression nachgeschalteter Regulatoren (BAUER et al., 2004), wodurch der zirkadiane Rhythmus (MARTÍNEZ-GARCÍA et al., 2000), die rotlichtinduzierte

Anthocyanakkumulation (LIU et al., 2015) und die Synthese photosynthetisch aktiver Pigmente gesteuert werden (TOLEDO-ORTIZ et al., 2014). Durch Regulierung, Beeinflussung und direkte Interaktionen werden Hormonsignalkaskaden modifiziert (DE LUCAS und PRAT, 2014; DE WIT et al., 2016), und die Biosynthese von Auxin (FRANKLIN et al., 2011; HERSCH et al., 2014; SUN et al., 2012a), Abscicinsäure (OH et al., 2009, 2007) und Ethylen gesteigert (KHANNA et al., 2007). Die Gibberellinsäuresignalübertragung wird hingegen unterdrückt (OH et al., 2009, 2007).

PI-Faktoren sind nicht nur Bestandteil lichtinduzierter Signalkaskaden, sondern werden auch durch die Temperatur gesteuert. Niedrige Temperaturen verringern die PIF-Aktivitäten durch ein geringeres Transkriptionslevel, eine Destabilisierung des PIF4-Proteins (KUMAR et al., 2016) und die temperaturabhängige Thermoreversibilität des PhyB. Bei hohen Temperaturen zeigt das PIF4 hingegen eine erhöhte Stabilität und Aktivität (JOHANSSON et al., 2014; JUNG et al., 2016; LEGRIS et al., 2016; PAIK et al., 2017). Im Gegensatz zu PhyB unterdrückt Cry1 das PIF-vermittelte Hypokotylwachstum auch bei hohen Temperaturen (MA et al., 2016). Durch eine direkte Aktivierung der Auxin-Biosynthesegene (DELKER et al., 2014; FRANKLIN et al., 2011; KOINI et al., 2009; SUN et al., 2012a) steuern PIFs das Temperaturinduzierte Längenwachstum (FRANKLIN et al., 2011; JOHANSSON et al., 2014; SUN et al., 2012a) und kontrollieren über FT (=FLOWERING LOCUS T) bei höheren Temperaturen die thermosensorische Aktivierung der Blüte (KUMAR et al., 2016).

Neben den PI-Faktoren haben Pflanzen weitere negative Regulatoren der Photomorphogenese entwickelt (LIAN et al., 2011). Als zweite zentrale Gruppe an Repressoren der Lichtsignalleitung gelten die **COP/DET/FUS**-Proteine. COP/DET/FUS ist eine Gruppe von Genen, die für COP1, DET1, COP10 und CSN Untereinheiten 1-4, 7 und 8 kodieren. Diese Proteine sind wiederum Bestandteile der COP1/SPA1-, CDD- und CSN-Multiproteinkomplexe (HUANG et al., 2014a). Die negative Regulation der Photomorphogenese beruht auf der Ubiquitinierung und Degradation verschiedener photomorphogenesefördernder Schlüsseltranskriptionsfaktoren (BAUER et al., 2004; FRANCOSINI et al., 2014; HONG et al., 2008; JIAO et al., 2007; LAU und DENG, 2012; YI und DENG, 2005), unter anderem PhyA (SEO et al., 2004), PhyB (JANG et al., 2010), HY5 (HONG et al., 2008; LIAN et al., 2011; LIU et al., 2011), HYH (HOLM et al., 2002), LAF1 (BAUER et al., 2004; SOO SEO et al., 2003) und HFR1 (DUEK et al., 2004; DUEK und FANKHAUSER, 2003), wodurch beispielsweise das photoperiodische Wachstum (YU et al., 2008) und die Anthocyanbiosynthese (LI et al., 2012c; MAIER et al., 2013) beeinflusst werden.

Eine zentrale Schaltfunktion bei der Regulation der Organellenentwicklung, Photomorphogenese von Keimlingen, Stressreaktionen auf Umweltbedingungen und der Verknüpfung zwischen Licht und Phytohormonsignalübertragungen wird der multifunktionalen RING E3 Ubiquitin Ligase **COP1** bzw. dem COP1/SPA1-Komplex zugesprochen (HUANG et al., 2014b). Durch Interaktion mit photomorphogenesefördernden Transkriptionsfaktoren wie HY5 und MYB (HOLM et al., 2001; ULJON et al., 2016) werden diese Ziel für eine proteasomevermittelte Degradierung, wodurch die lichtinduzierte Genexpression ausgeschaltet wird. Reguliert werden durch COP1 unter anderem die photoperiodische Blütezeit

und der circadiane Rhythmus (YU et al., 2008), sowie die Anthocyanakkumulation in Dunkelheit (LI et al., 2012c; MAIER et al., 2013).

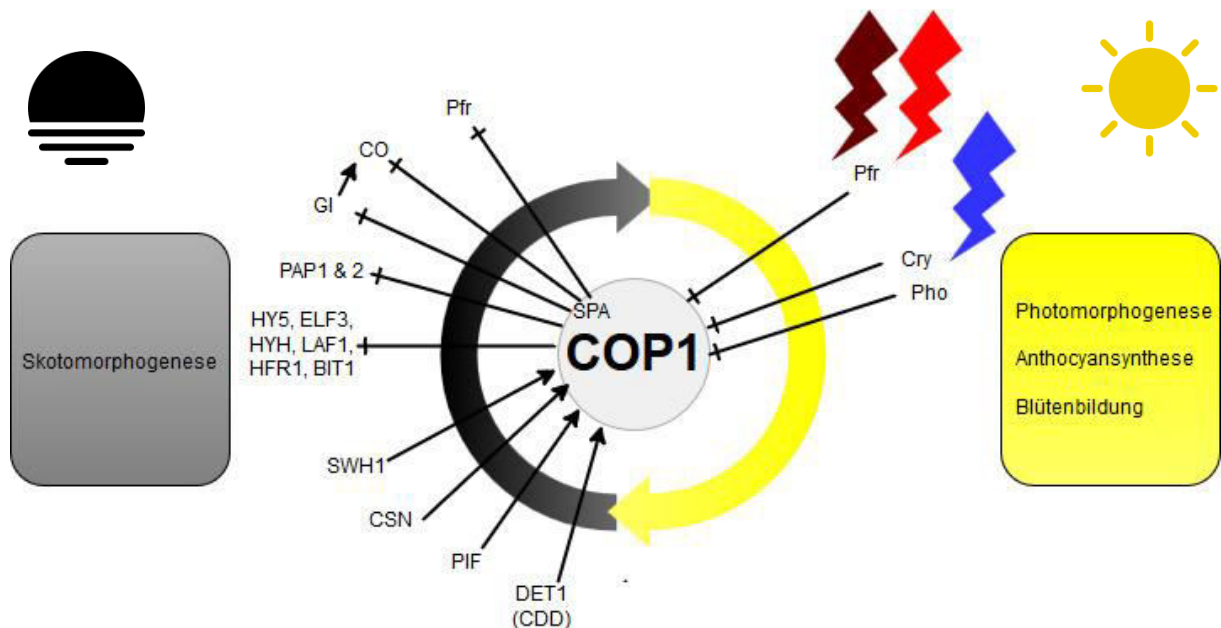


Abbildung 2.20: Einbindung des CONSTITUTIVE PHOTOMORPHOGENIC 1 (COP1)/ SPA-Komplexes in die photorezeptorvermittelte Regulation von Photomorphogenese, Blütezeit und Anthocyan-synthese. Unterstützt werden die COP1-Aktivitäten durch SPA (HOECKER und QUAIL, 2001; LAUBINGER et al., 2004; LIAN et al., 2011; LIU et al., 2011; SOO SEO et al., 2003; ZHU et al., 2008a), den CDD-Komplex (LAU und DENG, 2012), SHW1 (SHORT HYPOCOTYL IN WHITE LIGHT1) (BHATIA et al., 2011; SRIVASTAVA et al., 2015) und PIFs (XU et al., 2014). COP1 wirkt als negativer Regulator von Phy A und B (JANG et al., 2010; SEO et al., 2004) (JANG et al., 2010), CO (CONSTANS) und GI (GI-GANTEA) (YU et al., 2008), PAP (=PRODUCTION OF ANTHOCYANIN PIGMENT) 1 und 2 (LI et al., 2012c; MAIER et al., 2013), HY5, HYH, MYB (HOLM et al., 2001; ULJON et al., 2016), LAF1 (BAUER et al., 2004; SOO SEO et al., 2003), HFR1 (DUEK et al., 2004; DUEK und FANKHAUSER, 2003), und ELF3 (NIETO et al., 2015). Durch Cry1, PhyA und PhyB wird die COP1-Aktivität unterdrückt (CHEN et al., 2015; HONG et al., 2008; JIAO et al., 2007; LAU und DENG, 2012; LI et al., 2011a; LIU et al., 2011; SHEERIN et al., 2015; WANG et al., 2001; YANG et al., 2001)

COP1-Aktivitäten werden reduziert durch kalte Temperaturen (4°C) (CATALA et al., 2011) und Hitzeschocks (37°C) (KARAYEKOV et al., 2013). Durch Translokation bzw. Inaktivierung der COP1/SPA-Komplexe kommt es innerhalb weniger Stunden zu einer Akkumulation der photomorphogenesefördernden Transkriptionsfaktoren (LIN und SHALITIN, 2003; LIU et al., 2011; PACIN et al., 2014; YANG et al., 2001).

Ein weiterer COP/DET/FUS-Multiproteinkomplex ist **CSN** (COP9 Signalosome). Das Signalosome besteht aus acht Untereinheiten, genannt CSN1-CSN8 (FRANCOSINI et al., 2014). CSN-Komplexe beeinflussen die Photomorphogenese vorwiegend über zwei Wege:

- (1) Interaktion mit COP1/SPA-Komplexen, wodurch diese an ihren Wirkungsort gelangen (COPE und DESHAIES, 2003; KARNIOL und CHAMOVITZ, 2000; WANG et al., 2009; WEI und DENG, 1992). Auch die Stabilität des CDD-Komplexes wird beeinflusst durch CSN (SUZUKI et al., 2002).

(2) Regulation der Cullin-RING Ubiquitinligasen (CRLs) (NEZAMES und DENG, 2012) und E3 Ubiquitinligasen, wodurch die Proteindegradierung unterstützt wird (PACURAR et al., 2017; SANTNER und ESTELLE, 2010; SERINO und PICK, 2013). Dadurch werden die Blütenentwicklung (COPE und DESHAIES, 2003; SANTNER und ESTELLE, 2010) und Hormonsignalvermittlung durch Auxine, Gibberellinsäure, Jasmoninsäure, Ethylen, Abscisinsäure reguliert (SANTNER und ESTELLE, 2010). Zudem wurde eine Beeinflussung der Gehalte an Anthocyanen, photosynthetisch aktiven Pigmenten (WEI et al., 2018) und Ascorbinsäure (WANG et al., 2009) durch CSN beobachtet, wobei der Mechanismus nicht abschließend geklärt ist.

Der **CDD**-Komplex (COP10, DDB1, DET1) ist eine weitere Komponente im Ubiquitin-Proteasome-Weg der Photomorphogenese-Repression in Dunkelheit (SUZUKI et al., 2002; YANAGAWA et al., 2004) und wirkt ebenfalls durch eine Ubiquitinierung positiver Regulatoren der Photomorphogenese und anderer Prozesse (CHEN et al., 2006; LAU und DENG, 2012a; NIXDORF und HOECKER, 2010; OSTERLUND et al., 1999). Der Komplex bzw. einzelne Komponenten bewirkt die Unterdrückung der Photomorphogenese von Keimlingen in Dunkelheit (LAU und DENG, 2008), die lichtinduzierte Samenkeimung und reguliert den circadianen Rhythmus (LAU et al., 2011; MCCLUNG, 2011), die Blüteninduktion (KANG et al., 2015b, 2015a) und PIF-Aktivitäten (DONG et al., 2014; SHI et al., 2015) unter anderem durch Inaktivierung der HY5 (DELKER et al., 2014). Neben seiner Funktion in der Photomorphogenese deuten höhere Aktivitäten des CDD-Komplexes bei steigenden Temperaturen auch auf Funktionen bei der Thermogenese hin (DELKER et al., 2014).

2.2.3 Beeinflussung der Pflanzenentwicklung durch Lichtintensitäten und –spektren

Die Pflanzenentwicklung wird durch Pflanzenhormone gesteuert, die in Abschnitt 2.2.2 als Bestandteile lichtinduzierter Signalkaskaden beschrieben wurden. Die Beteiligung von Photorezeptoren bzw. nachgeschalteter Regulatoren an der hormonal regulierten Pflanzenentwicklung impliziert eine spektralbereichsabhängige Beeinflussung. Zusätzlich hängt das Pflanzenwachstum von der Verfügbarkeit an Photosynthaten und somit dem PAR-Wert ab (STUEFER und HUBER, 1998). Im folgenden Abschnitt werden die Reaktionen der Pflanzen auf natürlich vorkommende Lichtveränderungen beschrieben, wobei das Schattenvermeidungssyndrom im Fokus steht. Aufgrund der Möglichkeit eines gezielten Einsatzes monochromatischer Lichtquellen werden zudem Erkenntnisse bezüglich des Einflusses einzelner Spektralbereiche auf die Pflanzenentwicklung dargestellt.

Die Schattenbildung durch benachbarte Pflanzen bedeutet eine deutliche Reduktion des PAR-Wertes bei simultaner Veränderung der spektralen Lichtzusammensetzung (siehe Abbildung 2.21). Diese basiert auf einer Absorption vornehmlich blauer und roter Spektralbereiche (SMITH und WHITELAM, 1997), während der grüne Spektralbereich lediglich zu etwa 70-90% absorbiert wird (KASPERBAUER, 1987; ZUR et al., 2000). Als entscheidende Lichtveränderung wird jedoch die starke Verringerung des R:FR-Verhältnisses angesehen (Abbildung 2.9) (KASPERBAUER, 1971), resultierend in veränderten

Phytochromeaktivitäten (KASPERBAUER, 1971; LI et al., 2011a). Als Folge der Inaktivierung der PhyB bleiben nachgeschaltete PI-Faktoren aktiv und beeinflussen unter anderem durch eine Hochregulierung von Auxin, Abscisinsäure und Ethylen (siehe Abschnitt 2.2.2.2) die Pflanzenentwicklung. Der gesamte Mechanismus ist nicht abschließend geklärt, jedoch konnte nachgewiesen werden, dass der PIF7 in seiner aktiven Form die Expression von mehr als 150 Genen beeinflusst und insbesondere die Auxin-Produktion erhöht (LI et al., 2012b). Weiterhin wurden mit den lichtabhängigen Faktoren HFR1 und CSN (siehe Abschnitt 2.2.2.2) weitere Regulatoren der Auxin-, Gibberellinsäure- und Abscisinsäureaktivitäten identifiziert. Unter anderem ausgelöst durch lichtinduzierte Signalkaskaden beeinflussen Auxine das Streckungswachstum (PROCKO et al., 2016), wodurch Phototropismus (ESMON et al., 2006) und Gravitropismus (MCCLURE und GUILFOYLE, 1989) reguliert werden. Weiterhin werden die apikale Dominanz (TANAKA et al., 2006) und die Zellteilung (CAMPANONI und NICK, 2005) gefördert. Zugleich konnte durch eine vermehrte Auxinbildung im Schatten ein Abbau von Cytokininen (NORDSTRÖM et al., 2004) und eine vermehrte Bildung von Gibberellinsäure beobachtet werden (FRIGERIO et al., 2006; FU und HARBERD, 2003). Gibberellinsäure fördert im Spross die Zellstreckung und somit das Höhenwachstum (FUKAZAWA et al., 2000; TALON et al., 1991; TONG et al., 2014) und kontrolliert das Wurzelwachstum (FU und HARBERD, 2003). Als weiteres Pflanzenhormon, dass unter Schattenbedingungen in höheren Konzentrationen vorliegt, ist Abscisinsäure beteiligt an der Samenkeimung und Embryoentwicklung (GALAU et al., 1987; GUSTA et al., 2005; HILHORST und KARSEN, 1992; SCHROEDER et al., 2001). Durch die Regulierung des Stomata-Schließmechanismus (DESIKAN et al., 2002a; JONES und MANSFIELD, 1970; MCAINSH et al., 1990; TARDIEU und DAVIES, 1992) ist Abscisinsäure auch als Stresshormon bekannt (CHANDLER und ROBERTSON, 1994). Eine verstärkte Schließung der Stomata kann jedoch durch einen verringerten Gasaustausch die Photosyntheseleistung und somit die Biomassebildung beeinträchtigen (NAUTIYAL et al., 1994).

In den letzten Jahren sind eine Reduktion der Blaulicht-Photonenflussrate (BALLARE et al., 1991) und die relative Erhöhung des Grünlichtanteils (WANG und FOLTA, 2013) als Ursachen von Schattenvermeidungsreaktionen in den Fokus gerückt. Durch die geringe Aktivierung bzw. die Inaktivierung als Resultat der Absorption grüner Spektralbereiche (BOULY et al., 2007; ZHANG et al., 2011b) (siehe Abschnitt 2.2.2.1) kommt es auch bei den cryptochromevermittelten Signalkaskaden zu einer Akkumulation aktiver PI-Faktoren (KELLER et al., 2011), die unter anderem die Auxin-Biosynthese fördern (HORNITSCHKE et al., 2012), und zusätzlich möglicherweise die erhöhten Konzentrationen an Brassinosteroiden (KEUSKAMP et al., 2011; PIERIK et al., 2009), Abscisinsäure (KARNACHUK et al., 2002) und Ethylen (PIERIK et al., 2009, 2004) hervorrufen. Als Resultat werden Veränderungen der Blau- und Grünlichtanteile mit einer Hemmung cryptochromevermittelter Reaktionen assoziiert, unter anderem verlängerten Hypokotylen (FOLTA, 2004; KARNACHUK et al., 2001; KEUSKAMP et al., 2011; PIERIK et al., 2009), Internodien, Stängel und Petiolen (FOLTA, 2004; KELLER et al., 2011; ZHANG et al., 2011b) und hyponastischen Blätterbewegungen (KELLER et al., 2011; PIERIK et al., 2004). Eine Reduktion des Grünlichtanteils führte bei verschiedenen Pflanzen ferner zu Steigerungen des Frisch- und Trockengewichts

(KLEIN et al., 1965; XIAOYING et al., 2012) und wird unter anderem mit dessen umkehrender Funktion bei der blaulichtinduzierten Stomataöffnung in Zusammenhang gebracht (FRECHILLA et al., 2000). Deren Bedeutung ist jedoch umstritten, da Untersuchungen zeigen, dass diese dem diurnalen Rhythmus zu folgen scheinen und nur in den Morgenstunden relevant sind (TALBOTT et al., 2006).

Vergleichbare phänotypische Veränderungen werden mit einer Verringerung des R:FR-Verhältnisses assoziiert. Bei verschiedenen Pflanzen wurde eine steigende Pflanzenhöhe (BROWN et al., 1995; LUND et al., 2007; MORTENSEN und MOE, 1992b), bzw. ein verstärktes Triebwachstum (BALLARÉ et al., 1990; KASPERBAUER, 1987; STUEFER und HUBER, 1998) beobachtet. Auch wurde eine veränderte Photosynthat-Verteilung zugunsten des Stamms festgestellt (KASPERBAUER et al., 1984). Bei manchen Pflanzen wurden photomorphologische Veränderungen nur bei längerfristig reduzierten R:FR-Verhältnissen, beispielsweise Schattenbildung durch benachbarte Pflanzen, beobachtet (MORTENSEN und MOE, 1992), während bei anderen Pflanzen bereits kurzfristige Veränderungen während der Dämmerungsphasen einen Einfluss zeigten (KASPERBAUER, 1987). Jedoch wurde die spektrale Lichtzusammensetzung unter Schattenbedingungen auch mit einer positiven Beeinflussung der Biomassebildung assoziiert. Eine alleinige Reduktion des R:FR-Verhältnisses bei gleichen PAR-Werten führte mitunter zu höheren Biomassen (BROWN et al., 1995; KUBOTA et al., 2012; LI und KUBOTA, 2009; STUEFER und HUBER, 1998), begründet auf einer höheren Lichtabsorption durch eine vergrößerte Blattfläche (LI und KUBOTA, 2009) und eine erhöhte photosynthetische Effizienz durch den Emerson-Effekt (ZHEN und VAN IERSEL, 2017). Durch ein tieferes Eindringen grüner Spektralbereiche in das Blatt wurde durch zusätzliches grünes Licht eine Steigerung der Photosynthese beobachtet (TERASHIMA et al., 2009) und ist möglicherweise der Grund für höhere Frisch- und Trockenmassen, die in einigen Studien bei einer Erhöhung des Grünlichtanteils beobachtet wurden (LIN et al., 2013).

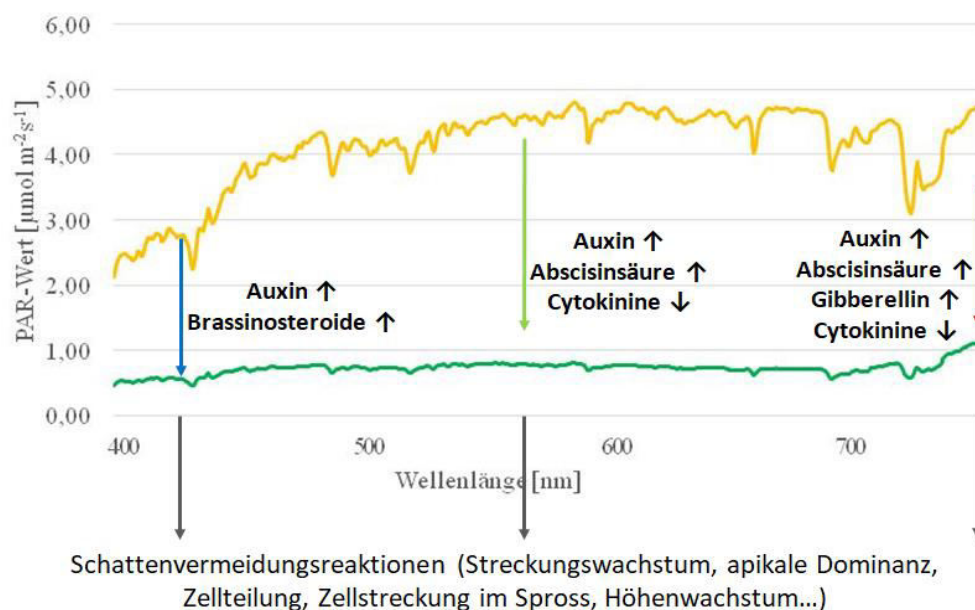


Abbildung 2.21: spektrale Lichtzusammensetzung bei Schattierung durch benachbarte Pflanzen (eigene Messung am 14.08.2018 um 12:00 Uhr in Berlin Dahlem, Lentzeallee 75; gemessen mit dem Spectra-Wiz Spectroradiometer PS-100), resultierende Veränderungen der Phytohormonkonzentrationen und Schattenvermeidungsreaktionen (eigene Abbildung)

Eine direkte Sonneneinstrahlung ist charakterisiert durch hohe PAR-Werte und vergleichsweise hohe Blau- und Rotlichtanteile, die ebenfalls zu Anpassungen der Pflanzenentwicklung durch Förderung bzw. Hemmung beteiligter Hormone führen. Beteiligt sind u. a. die Transkriptionsfaktoren HY5, HYH und MYB, die Bestandteile blau- und rotlichtinduzierter Signalkaskaden sind und die Aktivitäten von Auxin, Brassinosteroiden und Abscisinsäure unterdrücken (siehe Abschnitt 2.2.2.2).

Als Bestandteil phytochromevermittelter Signalkaskaden wurden bei Arabidopsis Cytokinine identifiziert, deren Synthese durch weißes und rotes Licht erhöht, durch fernrotes Licht gehemmt wurde. Ungeklärt blieb jedoch, ob PhyA alleine agiert, oder weitere Photorezeptoren wirken (DOBISOVA et al., 2017). Zudem wurde rotlichtinduziert ein Anstieg der Gibberellinsäurekonzentration beobachtet (TOYOMASU et al., 1993), sowie eine Reduktion der Abscisinsäuregehalte (TOYOMASU et al., 1994; WEATHERWAX et al., 1996). Auch blaulichtinduziert kam es bei Arabidopsis zu einer Regulierung der Expression von mehr als 400 Genen, resultierend in reduzierten Auxin- und Gibberellinsäuregehalten und erhöhten Akkumulationen von Abscisinsäure und Cytokinin (KARNACHUK et al., 2001; RANGCAI und RUICHI, 1997). Die Cytokinine als Bestandteile phytochrome- und cryptochromevermittelter Signalkaskaden sind eine Gruppe von Pflanzenhormonen, die aufgrund ihrer Funktion bei der Zellteilung (RIOU-KHAMLIHI et al., 1999), Differenzierungsprozessen (ALONI et al., 2006; DELLO IOIO et al., 2007) und einer, auf eine verzögerte Blattalterung zurückgeführten, Verlängerung der photosynthetischen Periode (GAN und AMASINO, 1995), mit einer erhöhten Photosyntheskapazität und steigenden Erträgen in Zusammenhang gebracht werden (ZHANG et al., 2014b). Zusätzlich beeinflussen Cytokinine Samenkeimung, Wurzelentwicklung und Triebwachstum (RIEFLER et al., 2006).

Weiterhin wurden auch Strigolactone als Bestandteile cryptochrome- und phytochromevermittelter Signalkaskaden identifiziert, reguliert durch HY5 und PIFs (JIA et al., 2014). Strigolactone sind bekannt als Wurzelausscheidungen (BREWER et al., 2013; WALDIE et al., 2014) und Einflussfaktoren der Wurzelentwicklung (KAPULNIK et al., 2011). Mittlerweile wurden neben Signalübertragungen im Wurzelraum auch Beteiligungen an der Pflanzenentwicklung (KOHLEN et al., 2012; LOPEZ-RAEZ et al., 2010), u. a. der Hypocotylwachstumshemmung (JIA et al., 2014), und am sekundären Pflanzenwachstum (AGUSTI et al., 2011; BREWER et al., 2013) nachgewiesen, möglicherweise bedingt durch eine Involvierung bei der Ressourcenverteilung. Dies inkludiert Veränderungen des Wurzelwachstums zwecks erhöhter Phosphataufnahme bei Phosphormangel (ANDREO-JIMENEZ et al., 2015; BREWER et al., 2013; KOLTAL, 2013), während im Hinblick auf eine Beeinflussung der Mineralstoffaufnahme bei ausreichender Versorgung keine Informationen vorliegen.

Durch den vergleichsweise hohen Anteil an Blau- und Rotlicht bietet unschattiertes Licht gute Bedingungen für die photosynthetische Energiegewinnung, welche als Schlüsselmechanismus der Biomassebildung gilt (STUEFER und HUBER, 1998). Als Folge verstärkter Lichtexpositionen konnten bei *Sinapis alba* höhere Frisch- und Trockenmassen, sowie ein höherer Trockenmasseanteil bestimmt werden. Länger andauernde hohe PAR-Werte führten durch Veränderungen der Blattmorphologie zu einer Beeinflussung der Streuung des Lichts (GRAHL und WILD, 1973). Hohe Rotlichtanteile werden zudem mit

einer verringerten Pflanzenhöhe und verzögerten Blüte assoziiert (CUMMINGS, 2011). Jedoch wurden bei einer Kultivierung unter monochromatischen Rotlicht typische Schattenvermeidungssymptome wie verlängerte Hypocotyle und Kotyledonen (HERNÁNDEZ und KUBOTA, 2016; HOENECKE et al., 1992), reduzierte Biomassen und eine verringerte Blattanzahl (BROWN et al., 1995; GOINS et al., 1997) beobachtet. Dies wird zurückgeführt auf eine verringerte Photosyntheserate (XIAOYING et al., 2011) durch ein dysfunktionales Photosynthesesystem unter monochromatischen Rotlicht (HOGEWONING et al., 2010b; SAVVIDES et al., 2012). Eine zusätzliche Bestrahlung mit Blaulicht kann diese Reaktionen verhindern (BROWN et al., 1995; HERNÁNDEZ und KUBOTA, 2016; HOENECKE et al., 1992).

Bestrahlungen mit Blaulicht erhöhen die photosynthetische Kapazität (HOGEWONING et al., 2010b; XIAOYING et al., 2011) und führen folglich auch zu gesteigerten Frisch- und Trockenmassen (HERNÁNDEZ und KUBOTA, 2016; NOVICKOVAS et al., 2012; SAMUOLIENE et al., 2012a). Photomorphogenetisch resultiert Blaulicht in Hypokotylwachstumshemmungen (KARNACHUK et al., 2001; NOVICKOVAS et al., 2012), reduzierten Stamm- und Petiolenlängen (COPE et al., 2014) und Erhöhungen der Blattwinkel (RANGCAI und RUICHI, 1997). Jedoch wurde auch beim Blaulicht beobachtet, dass eine Bestrahlung mit monochromatischen Blaulicht zu steigenden Pflanzenhöhen, Hypokotyl- und Epikotyl-längen führt (HERNÁNDEZ und KUBOTA, 2016), während nur eine Kombination beider Spektralbereiche Pflanzenwachstum und -entwicklung positiv beeinflusst (SAVVIDES et al., 2012). Unterschiedliche Studien mit verschiedenen Pflanzenspezies kommen bezüglich des optimalen B:R-Verhältnisses zu verschiedenen Ergebnissen. Bei Basilikum führte ein R:B-Verhältnis von 3:1 zu der größten Biomassebildung, obgleich die stomatäre Leitfähigkeit und PSII Quantumeffizienz reduziert waren (PENNISI et al., 2019). Nach PIOVENE et al. (2015) ist hingegen ein Verhältnis von 1,4 optimal für ein angemessenes Wachstum von Basilikum, während steigende Rotlichtanteile den Ertrag senken. Untersuchungen mit Crysanthemum zeigten das beste Pflanzenwachstum bei einem B:R-Verhältnis von 1, wobei ein erhöhter Blaulichtanteil eine Verringerung der Biomassebildung bewirkte (MORTENSEN und STRØMME, 1987). Bei *Lactuca sativa* wurde das Wachstum, einschließlich Frisch- und Trockenmasse, negativ durch eine Zugabe blauer LEDs bei roter Hintergrundbestrahlung beeinflusst (SON und OH, 2013).

Im Hinblick auf die Beeinflussung des Wachstums finden sich Hinweise auf eine Beteiligung der Temperatur. Mehrere Regulatoren kommen sowohl in den licht- als auch in den temperaturvermittelten Signalkaskaden vor (CATALA et al., 2011; TOLEDO-ORTIZ et al., 2014; ZHANG et al., 2011c). Bei hohen Temperaturen werden zudem Phytochrome inaktiviert (JUNG et al., 2016; LEGRIS et al., 2016), mit entsprechenden Wirkungen auf das Pflanzenwachstum. Folglich wird bei hohen Temperaturen u. a. ein gesteigertes Trieb-längenwachstum beobachtet (FRANKLIN et al., 2011; JOHANSSON et al., 2014; SUN et al., 2012a). Zudem werden Wechselwirkungen mit der Lichtintensität im Hinblick auf die Photosyntheseleistung beschrieben (HALDIMANN, 1999; LORENZ und WIEBE, 1980; YAMORI et al., 2005).

2.3 Wertgebende Inhaltsstoffe und deren Beeinflussung durch das Licht

Neben den in Abschnitt 2.2.2 beschriebenen photorezeptorvermittelten Signalkaskaden können auch reaktive Sauerstoffspezies (ROS) und ein veränderter Redoxstatus von Photosynthesekomponenten als Resultat einer übermäßigen Anregungsenergie als Signale für eine gesteigerte Synthese antioxidativ wirksamer Substanzen bei Lichtstress dienen (GALVEZ-VALDIVIESO et al., 2009; PAGE et al., 2012; VANDERAUWERA et al., 2005). ROS entstehen durch eine Übertragung freier Elektronen auf den allgegenwärtigen Sauerstoff im Rahmen der phototrophen Energiegewinnung bei Lichtüberschuss oder Problemen in der Elektronentransportkette.

Im folgenden Abschnitt wird deswegen die Entstehung reaktiver Sauerstoffspezies erläutert, mit Augenmerk auf der Photosynthese als Ursache. Anschließend werden die einzelnen Inhaltsstoffe dargestellt, deren Beeinflussung durch Licht im Rahmen dieser Arbeit untersucht wurde. Die ausführliche Literaturrecherche ist wichtig, um einen Überblick des derzeitigen Kenntnisstandes zu ermöglichen. Die Zusammenstellung der Funktionen dient der Klärung funktioneller Hintergründe einer möglichen Beeinflussung durch das Licht. Ferner wird dargestellt, dass die Pflanzen über verschiedene Mechanismen die Bildung von Inhaltsstoffen bzw. die Aufnahme von Mineralstoffen regulieren.

2.3.1 Oxidativer Stress in Pflanzen

Die Entstehung reaktiver Sauerstoffspezies (ROS) ist eine unvermeidbare Folge der photosynthetischen Aktivität und wird durch Licht und andere Faktoren zusätzlich gefördert (BIEHLER und FOCK, 1996; ROBINSON, 1988). Sie werden als Nebenprodukt des Calvin-Benson-Zyklus im Stroma der Chloroplasten (KIM und PORTIS, 2004), in der Atmungskette der Mitochondrien (KOWALTOWSKI et al., 1998; NOCTOR et al., 2007) und Elektronentransportkette in Peroxisomen (DEL RIO et al., 2006; DEL RÍO und LÓPEZ-HUERTAS, 2016) gebildet. Eine untergeordnete Rolle spielen das Endoplasmatische Retikulum (ZEESHAN et al., 2016), Plasmamembranen (FOREMAN et al., 2003), Zellwände (MÜLLER et al., 2009) und Apoplasten (HU et al., 2006). Der Hauptentstehungsort reaktiver Sauerstoffspezies in Pflanzen ist jedoch die Thylakoidmembran in den Chloroplasten (Abbildung 2.22). Aufgrund der wesentlich höheren Geschwindigkeit der primären photochemischen Reaktionen in den Photosystemen I und II im Vergleich zum Elektronentransport und dem nachgeschalteten Metabolismus in der Dunkelphase der Photosynthese, kann überschüssige Lichtenergie zu einem Energieungleichgewicht führen, welches die Entstehung reaktiver Sauerstoffspezies begünstigt (HUNER et al., 1998).

Die Anregung der Chlorophylle während des Lichtenergietransports zwischen Lichtsammelkomplexen und Reaktionszentren (SCHÄFER und SCHMID, 1993; SCHOPFER und BRENNICKE, 2010) begünstigt die Bildung angeregter Triplettchlorophylle (Triplett-Zustand: $^3\text{Chl}^*$) und Singulett-Sauerstoff ($^1\text{O}_2^*$) (SCHÄFER und SCHMID, 1993; TURRO, 1972). Als einziges ROS, dass nicht durch einen Elektronentransfer

entsteht (TRIANTAPHYLIDÈS und HAVAUX, 2009), ist Singulett-Sauerstoff unter optimalen Wachstumsbedingungen verantwortlich für mehr als 80% der nicht-enzymatischen Lipidperoxidation (TRIANTAPHYLIDÈS ET AL., 2008), Oxidationen von Proteinen (KRIEGER-LISZKAY et al., 2008; MAHLER et al., 2007; RINALDUCCI et al., 2004) und DNA (SIES und MENCK, 1992; WAGNER et al., 2004) durch selektive Reaktionen mit Deoxyguanosin (RAVANAT et al., 2006; RAVANAT und CADET, 1995) und hauptverantwortlich für den ROS-induzierten Zelltod (TRIANTAPHYLIDÈS et al., 2008). Vermutet wird zudem eine Funktion bei der Signalübertragung (TRIANTAPHYLIDÈS und HAVAUX, 2009).

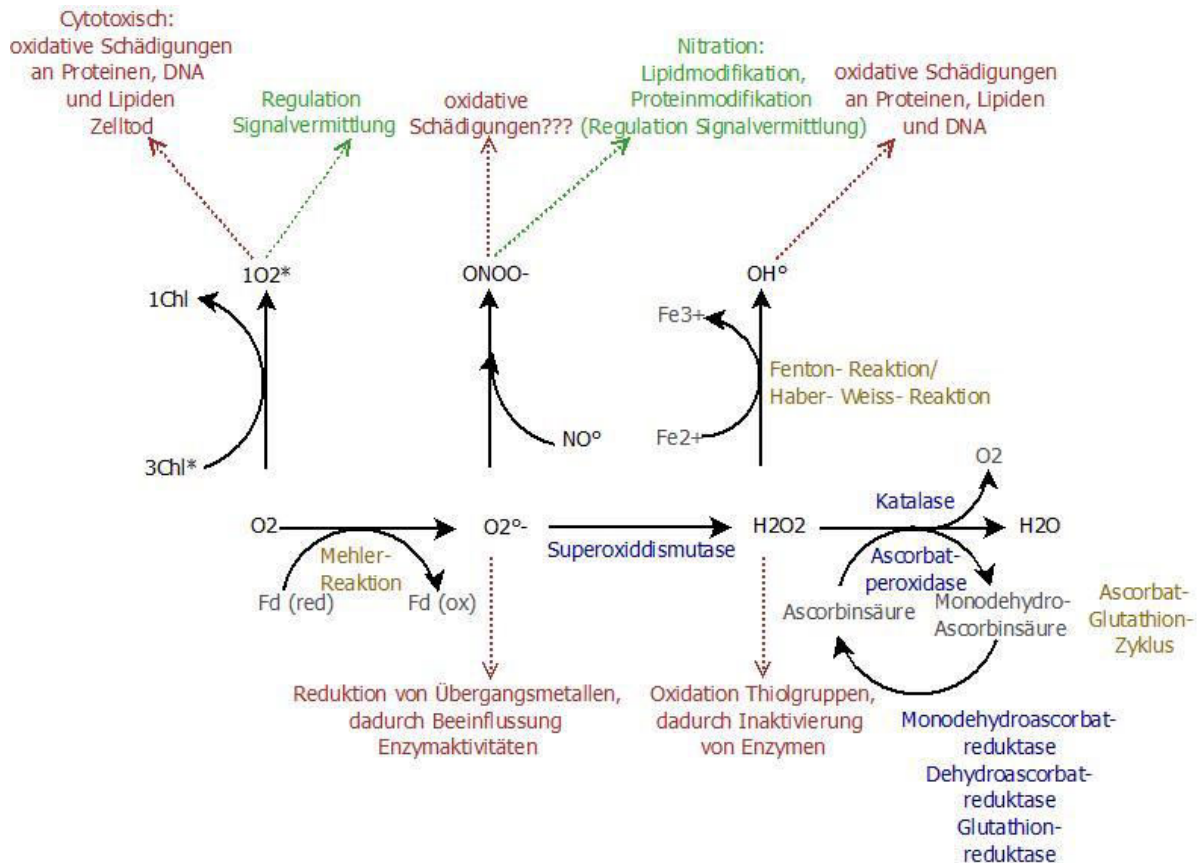


Abbildung 2.22: Entstehung reaktiver Sauerstoffspezies in den Chloroplasten: Durch einen Energietransfer von Tripletchlorophyll auf Sauerstoff entsteht Singulett-Sauerstoff (SCHÄFER und SCHMID, 1993; TURRO, 1972). Eine Reduktion von Sauerstoff führt zur Bildung von Superoxid (ASADA, 2006, 1999; ROCHAIX, 2011). Dieses kann über Superoxiddismutasen in Wasserstoffperoxid (H_2O_2) umgewandelt werden (ASADA, 2006) oder durch eine Reaktion mit Stickstoffmonoxid (NO^\bullet) zu Peroxynitrit ($ONOO^-$) reagieren (SAITO et al., 2006). Wasserstoffperoxid wird durch das antioxidativ-wirkende Enzym Katalase oder im Rahmen des Ascorbat-Glutathion-Zyklus in Wasser (H_2O) überführt (ASADA, 2006). Durch die Fenton-Reaktion ist auch die Bildung von Hydroxylradikalen (OH^\bullet) möglich (BARTOSZ, 1997). Blau gekennzeichnet sind beteiligte Enzyme, Rot/ grün: negative/positive Wirkungen der Metabolite, gelb: grundlegende Reaktionen oder Zyklen

Eine Übertragung von Elektronen durch das reduzierte Ferredoxin auf ein Sauerstoffmolekül während des pseudo-zyklischen Elektronentransportes führt zu einer direkten Reduktion von Sauerstoff, bezeichnet als Mehler Reaktion (ASADA, 2006, 1999; ROCHAIX, 2011). Das entstandene Superoxid weist eine geringe Reaktivität und Halbwertszeit auf und führt durch Reduktionen von Quinonen und Fe^{3+} und Cu^{2+} -Übergangsmetallkomplexen zu einer Aktivitätsbeeinflussung metallhaltiger Enzyme (FONG et al., 1976; GARG und MANCHANDA, 2009). Katalysiert durch die Superoxiddismutase wird das Superoxid

zu Wasserstoffperoxid reduziert (ASADA, 2006). Als Nicht-Radikal weist es eine mäßige Aktivität und hohe Halbwertszeit auf, sodass es von seinem Entstehungsort zu anderen Zellkompartimenten diffundieren kann (GARG und MANCHANDA, 2009). Wasserstoffperoxid kann durch Oxidation von Thiolgruppen Enzymaktivitäten beeinflussen (DELAUNAY et al., 2002; HANCOCK et al., 2006) und reguliert vermutlich die Expression einer Vielzahl an Genen (VANDENABEELE et al., 2003; VANDERAUWERA et al., 2005). Katalysiert durch Ascorbatperoxidasen und Katalasen wird Wasserstoffperoxid zu H_2O abgebaut (ASADA, 2006). Jedoch kann es durch nicht-enzymatische Reaktionen zwischen Stickstoffmonoxid und Superoxid zur Entstehung von Peroxynitrit kommen, welches die hohe Reaktivität von O_2^- und die gute Mobilität von NO vereint (SAITO et al., 2006). Die Wirkung von Peroxynitrit in Pflanzen ist nicht endgültig geklärt (ARASIMOWICZ-JELONEK und FLORYSZAK-WIECZOREK, 2011). Cytotoxische Eigenschaften sind bei Pflanzen bislang nicht bekannt (DELLEDONNE et al., 2001). Durch Reaktionen mit Tyrosinresten in Proteinen unter Bildung von Nitrotyrosin kommt es zu posttranslationalen Proteinmodifikationen (GALETSKIY et al., 2011a) und einer Beeinflussung der Funktionalität von Proteinen (ABELLO et al., 2009; GREENACRE und ISCHIROPOULOS, 2001). Nitrationen von Tyrosinresten affektieren weiterhin viele Signalübertragungswege, da eine Phosphorylierung der Tyrosine verhindert und die Regulationsmechanismen entsprechend beeinflusst werden (GALETSKIY et al., 2011b, 2011a; GREENACRE und ISCHIROPOULOS, 2001). Interaktionen von H_2O_2 mit reduzierenden Übergangsmetallionen (Fe(II) , Cu(I)) führen zur Bildung von Hydroxylradikalen. Als ROS mit der höchsten Aktivität reagieren diese unmittelbar nach ihrer Entstehung mit dem nächstverfügbaren organischen Molekül (BARTOSZ, 1997) und führen zu oxidativen Schädigungen von Chloroplasten (ASADA, 1999), Lipiden, DNA, Proteinen und Membranen (TUTEJA et al., 2001). Im Gegensatz zum Singulett-Sauerstoff weist das Hydroxylradikal bezüglich den Purin- und Pyrimidinbasen keine Substratspezifität auf (ROLDÁN-ARJONA und ARIZA, 2009).

Die Generierung reaktiver Sauerstoffspezies wird gefördert durch Umweltstressfaktoren, die eine Lichtnutzung für die Photosynthese verringern (HAVAUX und NIYOGI, 1999). So führen Temperaturanstiege zu Anpassungen der Transpiration, einhergehend mit einer geringen internen CO_2 -Konzentration, wodurch bei hohen Lichtintensitäten die Verfügbarkeit von NADP^+ verringert ist. Dies begünstigt eine Übertragung der überschüssigen Elektronen vom reduzierten Ferredoxin auf Sauerstoff unter Bildung von Superoxid (ASADA, 2006, 1999; ROCHAIX, 2011). Steigende Temperaturen senken zudem die Substratspezifität des Enzyms Rubisco gegenüber CO_2 , resultierend in der Oxygenasereaktion/Photorespiration. Dies führt durch die Aktivität der Glycolatoxidase zu einer verstärkten Wasserstoffperoxidproduktion (KIM und PORTIS, 2004). Vergleichbare Störungen können bei Lichtstress (DIETZEL und PFANN-SCHMIDT, 2008), Trockenheit (BIEHLER und FOCK, 1996; HU et al., 2006), Herbiziden (FUFEZAN et al., 2002), Schwermetallen (ROMERO-PUERTAS et al., 2002; SYTAR et al., 2013) und Salzstress auftreten (HERNÁNDEZ et al., 2001; LU et al., 2006; STEPIEN und KLOBUS, 2005). Als Bestandteil des Abwehrsystems werden ROS jedoch auch gezielt gebildet bei Luftverschmutzungen (LANGEBARTELS et al., 2002; LI und YI, 2012) und Pathogenbefall (HANCOCK et al., 2002; MEHDY, 1994). Wasserstoffperoxid

stimuliert die Zellwandperoxidasen und beschleunigt dadurch die Quervernetzung von Zellwandproteinen und Lignin, welche das Durchdringen von Pathogenen verhindert (THORDAL-CHRISTENSEN et al., 1997). Daneben agieren ROS direkt oder indirekt über oxidativ modifizierte Metabolite als Signalvermittler (BAXTER et al., 2014; MØLLER und SWEETLOVE, 2010) und sind beteiligt an der Regulation vieler Prozesse, die mit Pflanzenwachstum und –entwicklung assoziiert sind (FOREMAN et al., 2003; MULLER et al., 2009; PASSARDI et al., 2004). Erst bei Ungleichgewichten der ROS-Bildung und –abbau wird von oxidativem Stress gesprochen (FOYER et al., 1994).

2.3.2 Antioxidantien

Um Gleichgewichte zwischen positiven und schädigenden Wirkungen reaktiver Sauerstoffspezies zu schaffen, haben Eukaryoten komplexe Netzwerke aus zahlreichen Oxidanten-bildenden Enzymen (z.B. NADPH-Oxidase (FOREMAN et al., 2003)) und antioxidativ-wirksamen Enzymen (ARORA et al., 2002) aufgebaut. Diese umfassen die angesprochenen Superoxiddismutasen, Glutathionreduktasen und Peroxidasen (YORDANOVA et al., 2004). Glutathionreduktasen katalysieren die Reduktion des oxidierten Glutathions, welches Enzyme vor oxidativen Schädigungen schützt und an der Regeneration von Dehydroascorbinsäure beteiligt ist (BURKE et al., 1985; FOYER und HALLIWELL, 1976). Die Peroxidasen umfassen eine funktionelle Enzymgruppe, die mit verschiedenen Elektronendonatoren die Reduktion von Peroxiden katalysiert. Neben der Katalase, die Wasserstoffperoxid als Donator nutzt (RIZHSKY et al., 2002), und der Ascorbatperoxidase mit Ascorbinsäure als Elektronenspende (ASADA, 1992), zählen unter anderem die Glutathionperoxidase (MARGIS et al., 2008; ROXAS et al., 2000), Guaiacolperoxidase (MIKA und LÜTHJE, 2003) und NADH-Peroxidase (CHAOUI et al., 2004) dazu. Antioxidantien fungieren als Ergänzung der enzymatischen Entgiftung, beispielsweise bei der Inaktivierung von Hydroxylradikalen (SIGAUD-KUTNER et al., 2003).

2.3.2.1 Ascorbinsäure: Synthese, Funktion und Einflussfaktoren

Von besonderem Interesse für die menschliche Ernährung ist die Ascorbinsäure, die aufgrund des fehlenden Enzyms L-gulonolactone Oxidase nicht von Menschen, Primaten und Meerschweinchen gebildet werden kann und wegen ihrer einzigartigen Funktionalität als Vitamin eingestuft wurde (siehe Abschnitt 2.4.2) (DAVEY et al., 2000; SMIRNOFF, 2011; SMIRNOFF et al., 2000).

Nachdem die Ascorbinsäuresynthese in Tieren bereits in den 50iger Jahren aufgeklärt wurde, gab es bei der pflanzlichen Synthese bis vor einigen Jahren Unstimmigkeiten (SMIRNOFF et al., 2000). Mittlerweile wird der L-Galaktose-Biosyntheseweg, auch bekannt als Smirnoff-Wheeler-Weg, als dominierender, wenn nicht sogar einziger *Ascorbinsäuresyntheseweg* in höheren Pflanzen angesehen (DOWDLE et al., 2007; LIM et al., 2016; WHEELER et al., 1998).

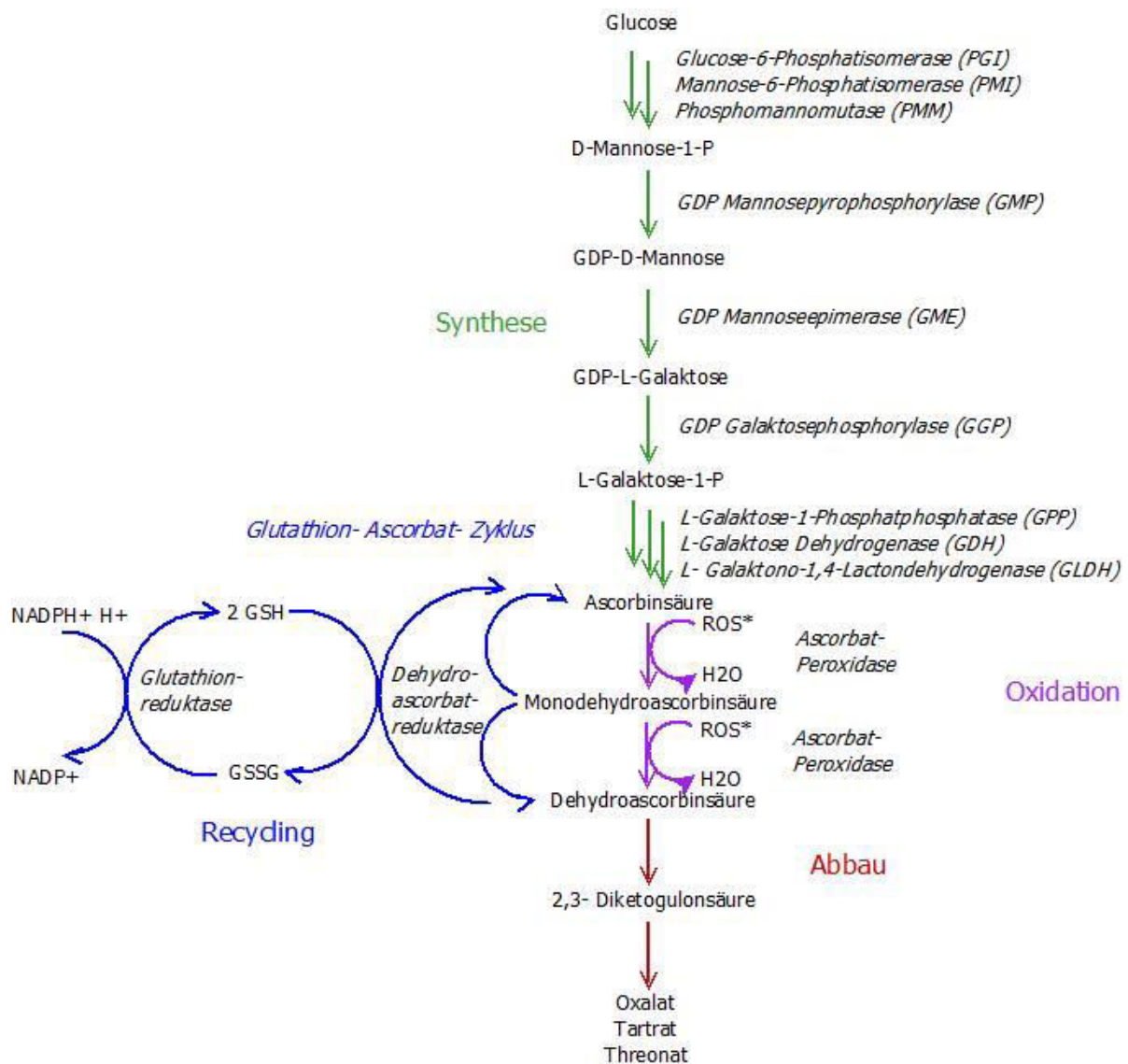


Abbildung 2.23: Schematische Darstellung der Synthese via L-Galaktose-Biosyntheseweg, Oxidation, Recycling über den Glutathion-Ascorbat-Zyklus und Abbau von Ascorbinsäure; in Anlehnung an LAING et al. (2017)

Als Ausgangssubstanz dient Glucose, die über L-Galaktose und Guanosindiphosphat (GDP)-Mannose in Ascorbinsäure überführt wird (DOWDLE et al., 2007) (Abbildung 2.23). Schlüsselenzyme des L-Galaktose-Biosyntheseweges sind die GDP-L-Galaktosephosphorylase (GGP) und GDP-Mannoseepimerase (GME) (DOWDLE et al., 2007; LAING et al., 2017). Weitere mögliche Biosynthesewege umfassen als Ausgangssubstanzen L-Gulono-1,4-Lacton und L-Galactono-1,4-Lacton (BAIG et al., 1970) oder die Uronsäuren D-Glucuron- und D-Galacturonsäure (FENECH et al., 2019), für die wiederum Pektin als Präcursor denkbar ist (BULLEY und LAING, 2016). Durch Oxidation der Ascorbinsäure entstehen Monodehydroascorbate (MDHA), die durch NAD(P) abhängige Enzyme oder Elektronenübertragungsreaktionen zu Ascorbinsäure reduziert werden. Zwei Moleküle MDHA können spontan in je ein Molekül Ascorbinsäure und Dehydroascorbinsäure (DHA) übergehen (DAVEY et al., 2000). Das Recyceln der Monodehydro- und Dehydroascorbate ist neben der De-Novo-Biosynthese entscheidend für den Ascorbinsäurehaushalt. Beteiligt am Glutathion-Ascorbatzyklus (Abbildung 2.23) sind die Dehydroascorbat-reduktase, Monodehydroascorbat-reduktase und Glutathionreduktase (CHEN et al., 2003; LAING et al.,

2017). Unter normalen Bedingungen liegt das vorhandene Ascorbat zu etwa 90% reduziert vor (BARTOLI et al., 2006; FOYER et al., 1983; TAMAOKI et al., 2003) und bestimmt durch seine reduzierenden Eigenschaften alle biologischen Funktionen der Ascorbinsäure (DAVEY et al., 2000). Obgleich Ascorbinsäure in allen Kompartimenten der pflanzlichen Zelle vor kommt (SMIRNOFF et al., 2000), ist ein Großteil (12-50%) in den Chloroplasten lokalisiert (FOYER et al., 1983; FOYER und LELANDIS, 1996; FRANKE und HEBER, 1964) und hat dort eine zentrale **Funktion** bei der Photosynthese (Abbildung 2.24). Für die reduzierenden Eigenschaften der Ascorbinsäure ist die reaktive Endiol-Gruppe am C2/3 des Moleküls verantwortlich (LEE et al., 2004). Als Antioxidant reagiert die Ascorbinsäure schnell mit Superoxiden, Hydroxyradikalen, Singulett-Sauerstoff, Ozon und Wasserstoffperoxid (ARRIGONI und DE TULLIO, 2002; BAGCHI et al., 1997; CASTILLO und GREPPIN, 1988; CHOU und KHAN, 1983; GOTOH und NIKI, 1992; LAW et al., 1983) und kann somit auch ROS neutralisieren, die nicht durch antioxidativ wirksame Enzyme inaktiviert werden (SIGAUD-KUTNER et al., 2003). Weiterhin unterstützt die Ascorbinsäure als Reduktionsmittel die Regenerierung von alpha-Tocopherol aus alpha-Chromoxylradikalen (MUNNÉ-BOSCH, 2005; NIKI, 1987) und fördert durch Reduktionen von Monolignolradikalen die Bildung von Monolignol und die Lignifizierung der Zellwände (OTTER und POLLE, 1994; TAKAHAMA und ONIKI, 2017). Durch Hemmung von Zellwandperoxidasen wird zudem die Zellwandfestigkeit reguliert (CORDOBA-PEDREGOSA et al., 1996; PASSARDI et al., 2005). Durch die reduzierenden Eigenschaften beeinflusst die Ascorbinsäure die Aktivitäten diverser Enzyme, z.B. von Mono- und Dioxygenasen (DAVEY et al., 2000) und der Violaxanthindeepoxidase (Abbildung 2.24) (BRATT et al., 1995; ESKLING und ÅKERLUND, 1998; MULLER-MOULE et al., 2002), wodurch die Bildung von Glucosinolaten (BURMEISTER et al., 2000) und struktureller Zellwandproteine (ARRIGONI et al., 1977; CARPITA und GIBEAUT, 1999; DE GARA et al., 1991) unterstützt wird. Durch Hydrolysierung des Dehydroascorbats zu 2,3-Diketogulonsäure werden Oxalate, Threonate und Tartrate gebildet (DEBOLT et al., 2006; NAKATA, 2003; SAITO, 1996). Oxalat wiederum kann Calcium binden (FRANCESCHI, 2001; FRANCESCHI und NAKATA, 2005), resultierend in weniger Quervernetzungen zwischen Polygalakturonsäureketten über Calciumbrücken und einer gesteigerten Zellwanddehnbarkeit (VIRK und CLELAND, 1988). Daneben dienen Calcium-Oxalat-Kristalle der Aufrechterhaltung der Calciumhomöostase (KOSTMAN und FRANCESCHI, 2000; VOLK et al., 2002), Schutz vor Fraßfeinden (RUIZ et al., 2002; WARD et al., 1997) und möglicherweise einer besseren Lichtverteilung in den Chloroplasten (FRANCESCHI, 2001). Durch den Einbau von Schwermetallen in die Kristalle kann einer Vergiftung vorgebeugt werden (CHOI et al., 2001; FRANCESCHI und SCHUEREN, 1986; JÁUREGUI-ZÚÑIGA et al., 2005; MAZEN und EL MAGHRABY, 1997).

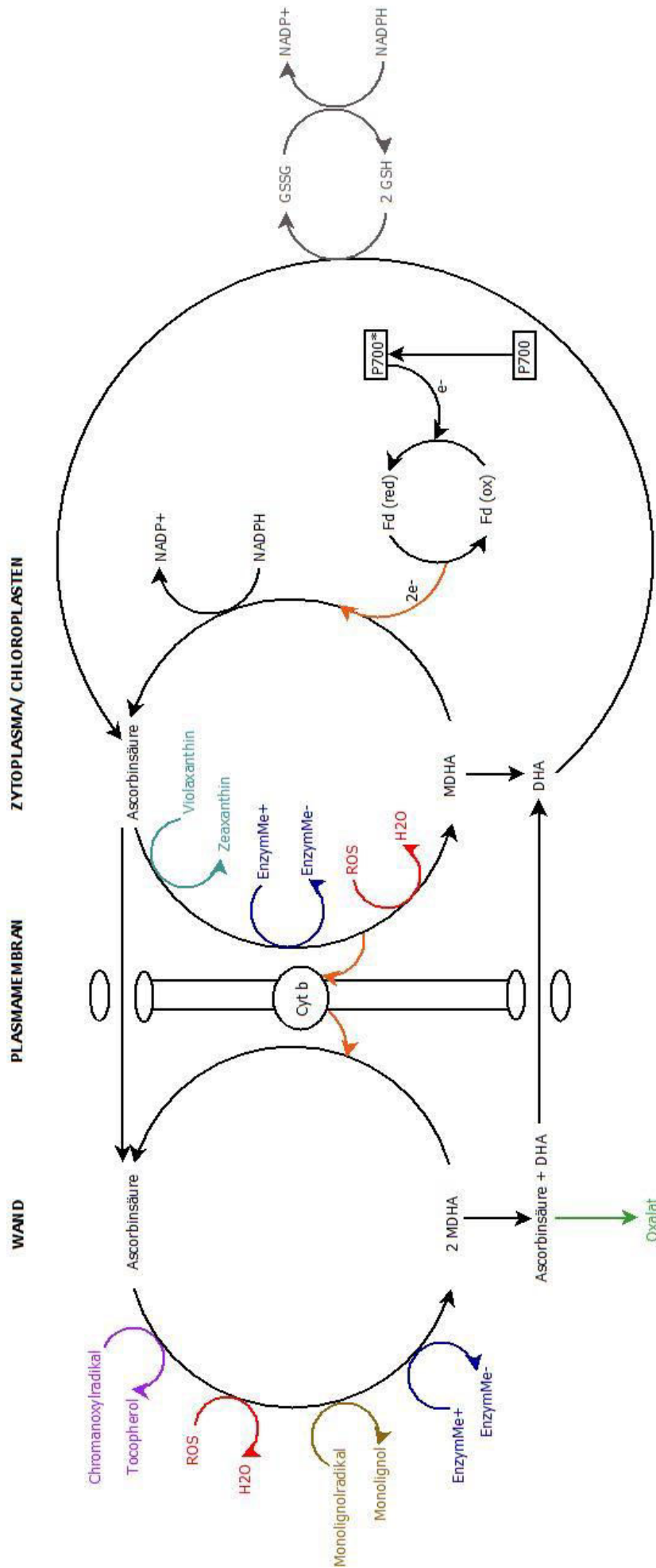


Abbildung 2.24: Funktionen der Ascorbinsäure; orange dargestellt ist der Elektronentransport vom PSI bzw. Zytoplasma über MDHA/Ascorbinsäure (FORTI und EHRENHEIM, 1993; MIYAKE und ASADA, 1992); lila dargestellt ist die Regenerierung von Tocopherolen (MUNNÉ-BOSCH, 2005; NIKI, 1987); türkis dargestellt Ascorbinsäure als Cofaktor der Violaxanthin-Epoxidase (BRATT et al., 1995; ESKLING und ÅKERLUND, 1998; MULLER-MOULE et al., 2002); rot dargestellt die Reduzierung von Radikalen (ARRIGONI und DE TULLIO, 2002; BAGCHI et al., 1997; CASTILLO und GREPPIN, 1988; CHOU und KHAN, 1983; GOTOH und NIKI, 1992; LAW et al., 1983); grün dargestellt DHA/Ascorbat als Präcursor für Oxalat (DEBOLT et al., 2006; NAKATA, 2003; SAITO, 1996); braun dargestellt die Reduktion von Monolignolradikal (OTTER und POLLE, 1994; TAKAHAMA und ONIKI, 2017); blau dargestellt die Reduktion von Metallen im Zentrum von Enzymen (DAVEY et al., 2000); grau dargestellt die Reduktion von Dehydroascorbinsäure durch Glutathion (CHEN et al., 2003; LAING et al., 2017)

Die Verteilung der Ascorbinsäure in den pflanzlichen Zellen sowie deren Funktionen beim photosynthetischen Elektronentransport und Quenchen von ROS (YABUTA et al., 2007) kann die **Beeinflussung** der Ascorbinsäureakkumulierung durch die Lichtintensität erklären, die in vielen Studien gezeigt wurde (BARTOLI et al., 2006; DOWDLE et al., 2007; GILLHAM und DODGE, 1987; LOGAN et al., 1996; WANG et al., 2013a; YABUTA et al., 2007; ZHANG et al., 2009). Die Geschwindigkeit der Anpassung des Ascorbinsäuregehalts an die Lichtveränderungen ist vermutlich pflanzenspezifisch und liegt zwischen 30 Stunden (LAING et al., 2017) bzw. zwei Tagen (PAGE et al., 2012) bei *Arabidopsis*, 10 h bei *Phaseolus vulgaris* (BARTOLI et al., 2009) und 3 h bei *Avena sativa* (MASTROPASQUA et al., 2012). Auf zellulärer Ebene werden die lichtinduzierten Steigerungen der Ascorbinsäurebiosynthese durch Aktivitätserhöhungen beteiligter Enzyme wie der L-Galakton-1,4-Lactondehydrogenase (BARTOLI et al., 2006; MASTROPASQUA et al., 2012; TAMAOKI et al., 2003; YABUTA et al., 2007), der GDP-Mannosepyrophosphorylase, der L-Galaktose-1-P-Phosphatase (YABUTA et al., 2007), der GGP und GME (DOWDLE et al., 2007; LAING et al., 2017) erklärt. Als negative Regulatoren wurden CSN5B (WANG et al., 2013b, 2013a) und AMR1 (ASCORBIC ACID MANNOSE PATHWAY REGULATOR 1) (ZHANG et al., 2009) identifiziert, die bei sinkenden Lichtintensitäten die Aktivitäten beteiligter Enzyme verringern. Weiterhin gibt es Indizien für eine Beteiligung von ROS und Veränderungen des Redoxstatus von Photosynthese-Komponenten an der Regulation der Ascorbinsäuresynthese (PAGE et al., 2012; ZHANG et al., 2012).

Ferner werden Erhöhungen der Ascorbinsäurekonzentrationen bei hohen Lichtintensitäten mit Steigerungen der Expressionen (LAING et al., 2017) und Aktivitäten von Dehydro- und Monodehydroascorbatreduktase (BARTOLI et al., 2006; GILLHAM und DODGE, 1987) assoziiert, wodurch das Recycling oxidierter Ascorbinsäurederivate gefördert wird. Möglicherweise ist auch die Verfügbarkeit des Präcursors Glucose relevant für die Ascorbinsäurebiosynthese (BULLEY und LAING, 2016). Häufig beschrieben wird eine Beeinflussung des Ascorbinsäuregehalts durch den diurnalen Rhythmus (BARTOLI et al., 2006; DOWDLE et al., 2007; TAMAOKI et al., 2003; WANG et al., 2013a; WANG et al., 2009), welche jedoch nicht in allen Studien beobachtet wurde (LAING et al., 2017). Lichtbedingte Veränderungen der Ascorbinsäurekonzentration werden zudem durch andere Faktoren beeinflusst, unter anderem durch das Blattalter (ZHANG et al., 2009) und die Temperatur (LAING et al., 2017; MASSOT et al., 2013), die Beeinflussung der Photosyntheserate die Entstehung von ROS bedingt (ALLEN und ORT, 2001; HUNER ET AL., 1998; TAYLOR und ROWLEY, 1971).

Untersuchungen im Hinblick auf die Beeinflussung des Ascorbinsäuregehalts durch einzelne Spektralbereiche zeigen keinen eindeutigen Zusammenhang. Ein gesteigertes R:FR-Verhältnis in den Blättern von *Phaseolus vulgaris* L. führte zu einem höheren Ascorbinsäuregehalt, erklärt durch eine präventive Akkumulation als Schutz vor lichtinduzierten, oxidativen Schädigungen der photosynthetischen Gewebe bei starker Sonnenbestrahlung (BARTOLI et al., 2009). Weiterhin wurden positive Beeinflussungen durch Blaulicht in *Avena sativa* L. (MASTROPASQUA et al., 2012) und Grünlicht in *Lactuca sativa* L.

festgestellt, zurückgeführt auf eine geringere Absorption grüner Spektralbereiche durch Photosynthesepigmente in den oberen Zellschichten (SAENGTHARATIN et al., 2018).

2.3.2.2 Carotinoide: Synthese, Funktion und Einflussfaktoren

Carotinoide sind eine vielfältige Gruppe farbiger Pigmente, die von Pflanzen, Algen, Pilzen und Bakterien gebildet werden (CAZZONELLI und POGSON, 2010). Strukturell gehören sie zu den Isoprenoiden, die über konjugierte Doppelbindungen im Molekül kurzwelliges Licht absorbieren (FIESER, 1950).

Carotinoide leiten sich ab vom plastidlokalisierten 2-C-Methyl-D-Erythritol 4-Phosphat (MEP) **Biosyntheseweg**, mit Glyceraldehyd-3-Phosphat und Pyruvat als Vorstufen, den Isoprenoiden Isopentenylpyrophosphat (IPP) und Dimethylallylpyrophosphat (DMAPP) als Zwischenstufen und Geranylgeranylpyrophosphat (GGPP) als vorläufigem Endprodukt (Abbildung 2.25) (GANJEWALA und KUMAR, 2008; HUNTER, 2007; PHILLIPS et al., 2008). Katalysiert durch das Schlüsselenzym Phytoenesynthase (PSY) werden zwei GGPPs kondensiert. Ausgehend vom farblosen Phytoene (HARDING und TURNER, 1981; SHEWMAKER et al., 1999) kommt es durch den Einbau von Doppelbindungen zu einer Verschiebung des Absorptionsmaximums der Verbindungen in den sichtbaren Bereich (GARCIA-ASUA et al., 1998; MATTHEWS et al., 2003; SCOLNIK und BARTLEY, 1993). Das entstandene Lycopin kann durch ϵ - und/ oder β -Cyclasen an einem oder beiden Enden cyclisiert werden (CUNNINGHAM et al., 1996). Die entstandenen Carotine können anschließend zu Xanthophyllen hydroxyliert werden (CAZZONELLI und POGSON, 2010; DAVISON et al., 2002; DIRETTO et al., 2007).

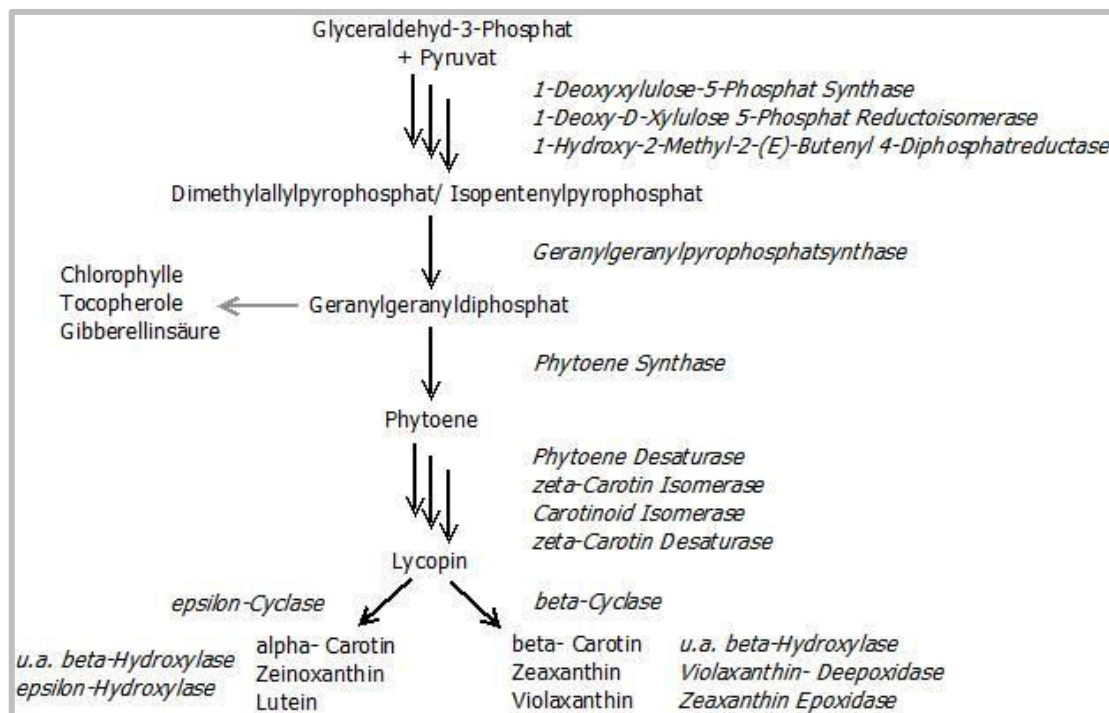


Abbildung 2.25: Carotinoidsynthese in Pflanzen (nach Informationen von CAZZONELLI und POGSON, 2010; CUNNINGHAM et al., 1996; GANJEWALA und KUMAR, 2008; GARCIA-ASUA et al., 1998; HARDING und TURNER, 1981; HUNTER, 2007)

Die **Funktionen** der Carotinoide in der Pflanze sind dicht geknüpft an die photosynthetischen Vorgänge in den Chloroplasten. Bei geringen Lichtintensitäten fungieren Carotinoide als akzessorische Pigmente und unterstützen die Photosynthese. Bei photooxidativem Stress hingegen wirken Vertreter der Carotinoide antioxidativ, photoprotektiv, können überschüssige Energie ableiten sowie Strukturen aufbauen und stabilisieren (FRANK et al., 1997). Durch die Eigenschaft vieler Carotinoide, sichtbares Licht zu absorbieren, tragen diese zudem zur Farbgebung der Pflanzen bei, die der Attraktion von Insekten, Vögeln und Tieren zwecks Bestäubung und Samenverteilung dient (TANAKA et al., 2008).

Lokalisiert in den Photosystemen unterstützen Carotinoide das Quenchen von Triplettchlorophyll und Singulett-Sauerstoff, werden bei diesem Prozess jedoch nicht verbraucht (RAMEL et al., 2012; TRIANTAPHYLIDÈS und HAVAUX, 2009). Bestimmt werden die antioxidativen Eigenschaften der einzelnen Carotinoide durch funktionelle Gruppen, terminale Ionenringe und die Anzahl an konjugierten Doppelbindungen (CONN et al., 1991; MILLER et al., 1996). Zeaxanthin schützt die Thylakoidmembranlipide vor oxidativen Stress bei hohen Lichtintensitäten (DAVISON et al., 2002; HAVAUX et al., 2007), ist beteiligt an der Prävention der Lipidperoxidation (HAVAUX und NIYOGI, 1999) und schützt das Reaktionszentrum des PSII vor Übererregung und daraus resultierender Photoinhibierung (HAVAUX und NIYOGI, 1999). Gemeinsam mit Ascorbinsäure können Zeaxanthine α -Tocopherolradikale regenerieren, welche bei der Reduktion von Oxiradikalen entstehen (BOHM et al., 1997; HAVAUX und NIYOGI, 1999).

Durch die Absorptionseigenschaften der Carotinoide im Bereich von 400-550 nm wird das Absorptionsspektrum der Photosynthese um den kurzwelligen Grünlichtbereich erweitert (SIEFERMANN-HARMS, 1987). Jedoch sind nur die, in den Photosystemen lokalisierten akzessorischen Pigmente β -Carotin, Lutein, Neoxanthin und Violaxanthin (LICHTENTHALER, 1987; POGSON et al., 1996; SIEFERMANN-HARMS, 1985) fähig dazu, die Energie auf ein Chlorophyllmolekül zu übertragen (SIEFERMANN-HARMS, 1985, 1987) (siehe Abschnitt 2.2.1). Pflanzen sind bei wechselnden Lichtintensitäten in der Lage, die Carotinoidzusammensetzung an die Bedürfnisse anzupassen. Violaxanthine unterstützen bei niedrigen PAR-Werten den Elektronentransport zum Chlorophyll a hin, Zeaxanthin bei hohen PAR-Werten den Elektronentransport vom Chlorophyll a weg (HAVAUX und NIYOGI, 1999). Weiter kommt es bei hohen Lichtintensitäten und/oder hohen Temperaturen zu einer Translokalisierung der Xanthophylle in die Lipidphase der Thylakoidmembranen. Durch Interaktionen mit Membranlipiden wird die Membranfluidität verringert, die Anfälligkeit für Lipidperoxidationen gesenkt und die Thermostabilität gesteigert (GRUSZECKI und STRZALKA, 2005; HAVAUX, 1998; TARDY und HAVAUX, 1997). Unabhängig von ihren antioxidativen und lichtsammelnden Eigenschaften werden Carotinoide zu Apocarotinoiden abgebaut (FLOSS und WALTER, 2009; HOU et al., 2016; OHMIYA, 2009; SIMKIN et al., 2004), zu denen Abscisinsäure (CHERNYS und ZEEVAART, 2000; LÓPEZ-RÁEZ und BOUWMEESTER, 2008; SCHWARTZ et al., 2001) und Strigolactone (KOHLEN et al., 2012; LÓPEZ-RÁEZ und BOUWMEESTER, 2008) zählen, wodurch ein indirekter Zusammenhang mit der Pflanzenentwicklung besteht (siehe 2.2.3). Weiterhin zählen zu den Apocarotinoiden auch volatile Substanzen, die das Aroma der Pflanzen beeinflussen (OHMIYA, 2009).

Durch die Beteiligung der Carotinoide an der Photosynthese wurde in vielen Untersuchungen eine **Regulation** durch das Licht nachgewiesen. Steigende Lichtintensitäten führten in den Blättern von *A. thaliana* zu höheren Lutein-, β -Carotin-, Viola-, Anthera- und Zeaxanthingehalten (BALLOTTARI et al., 2007). LOGAN et al. (1996) konnten durch steigende Lichtintensitäten eine Erhöhung des Gesamtcarotinoidgehalts, Chlorophyll a:b-Verhältnisses, sowie der Gehalte an β -Carotin und Viola-, Anthera- und Zeaxanthin in 19 subtropischen Pflanzen nachweisen, während der Lutein- und Neoxanthingehalt kaum beeinflusst wurde. CZECHUGA (1987) zeigte hingegen bei 76 Pflanzen, einschließlich *P. odorata*, eine Zunahme des Gesamtcarotinoidgehalts durch Kultivierung im Schatten. Die Schattierung erhöhte den relativen β -Carotin- und Violaxanthingehalt und verringerte den relativen Lutein- und Zeaxanthingehalt. In Blättern von *Capsicum annuum* L. wurde die Neusynthese von Carotinoiden durch steigende Lichtintensitäten gesteigert. Eine verstärkte photooxidative Degradation verringerte den Carotinoidgehalt jedoch insgesamt (SIMKIN et al., 2003). Eine Erhöhung des Carotenoidgehalts sowohl durch Steigerung als auch durch Reduktion des PAR-Wertes wurde bei *Dioscorea zingiberensis* gemessen, wobei höhere PAR-Werte insbesondere zu Steigerungen der β -Carotin- und Neoxanthingehalte führten (LI et al., 2002). Bei Bestrahlung mit einzelnen Spektralbereichen bewirkte Blaulicht in *A. thaliana* (VON LINTIG et al., 1997) und *Spinacia oleracea* (OHASHI-KANEKO et al., 2011) eine Erhöhung des Gesamtcarotinoidgehalts, in *Lactuca sativa* eine Verringerung (OHASHI-KANEKO et al., 2011). Der Effekt von Rotlicht bei *A. thaliana* war hingegen deutlich geringer (VON LINTIG et al., 1997).

Auf regulatorischer Ebene wurde eine Beeinflussung der Carotinoidsynthese durch Komponenten der Lichtsignalübertragung beobachtet. Die negativen Regulatoren der Photomorphogenese, DDB1 und DET1, (siehe Abschnitt 2.2.2.2) (DAVULURI et al., 2005, 2004; LEVIN et al., 2003; LIU et al., 2004; MUSTILLI et al., 1999) sowie COP1 (LIU et al., 2004) werden mit Reduktionen des Carotinoidgehalts assoziiert, höhere Aktivitäten des positiven Transkriptionsfaktors HY5 mit einer Gehaltssteigerung (LIU et al., 2004). Jedoch wurde auch der PI-Faktor 5 als positiver Regulator des MEP-Syntheseweges identifiziert (MANNEN et al., 2014), der als negativer Regulator der Photomorphogenese (siehe Abschnitt 2.2.2.2) bei Lichtexposition inaktiviert wird. Durch hohe PAR-Werte positiv beeinflusst werden die Transkriptionslevel aller Gene des MEP-Weges (CORDOBA et al., 2009; HSIEH und GOODMAN, 2005; KAWOOSA et al., 2010; RODRIGUEZ-CONCEPCION et al., 2004), zurückgeführt auf die Photosynthese-abhängige Verfügbarkeit der Substrate, Feedback-Regulation durch Aktivitäten der PSY und die transkriptionale Regulationen der Schlüsselenzyme durch den circadianen Rhythmus (CORDOBA et al., 2009; POKHILKO et al., 2015; RODRÍGUEZ-VILLALÓN et al., 2009a, 2009b). Transkriptionslevel bzw. Aktivitäten der Phytoene-Synthase, Schlüsselenzym der Carotinoidsynthese (CAZZONELLI und POGSON, 2010; RODRÍGUEZ-VILLALÓN et al., 2009a), werden durch steigende Lichtintensitäten (HARDING und TURNER, 1981; RODRÍGUEZ-VILLALÓN et al., 2009a; SHEWMAKER et al., 1999; SIMKIN et al., 2003), Blaulicht (LI et al., 2008; SPURGEON et al., 1979), rotes und fernrotes Licht (LI et al., 2008; MEIER et al., 2011; SCHOFIELD und PALIYATH, 2005; VON LINTIG et al., 1997; WELSCH et al., 2000) erhöht, vermittelt durch Cryptochrome, Phototropine und Phytochrome (LI et al., 2008). Beteiligt an der

photorezeptorregulierten Carotinoidsynthese sind vermutlich PI-Faktoren (TOLEDO-ORTIZ et al., 2010) und HY5 (CHEN et al., 2016; TOLEDO-ORTIZ et al., 2014).

Steigerungen der Carotinoidsynthese wurden bei kühlen Umgebungstemperaturen beobachtet (TOLEDO-ORTIZ et al., 2014), möglicherweise bedingt durch die temperaturabhängige Aktivität des HY5 (siehe Abschnitt 2.2.2.2) und die erhöhte Expression der DXS, Schlüsselenzym der Isoprenoidsynthese, (ENFISSI et al., 2005; ESTÉVEZ et al., 2001; GONG et al., 2006) bei geringeren Temperaturen (15 statt 25 °C) (KAWOOSA et al., 2010). Die Expressionslevel der PSY unterliegen zudem dem circadianen Rhythmus mit einem Maximum am Morgen (FACELLA et al., 2008; LOIVAMAKI et al., 2006). Möglicherweise wird die Neusynthese auch indirekt durch Photooxidationsprodukte der Carotinoide angeregt (SIMKIN et al., 2003). Der Einfluss von Carotinoiddioxygenasen auf den Carotinoidgehalt ist vermutlich vernachlässigbar. Zwar werden deren Aktivitäten ebenfalls durch verschiedene Umweltfaktoren beeinflusst, unter anderem der Phosphorverfügbarkeit im Boden (LÓPEZ-RÁEZ und BOUWMEESTER, 2008), Tageszeitpunkt bzw. Lichtverfügbarkeit bei *Petunia hybrida* (SIMKIN et al., 2004), Trockenheit (IUCHI et al., 2002; QIN und ZEEVAART, 1999) und Reifegrad bei Früchten (KARPPINEN et al., 2016). Jedoch zeigten Untersuchungen mit verschiedenen Spezies, dass der Carotinoidkatabolismus den Carotinoidgehalt kaum beeinflusst (DU et al., 2010; KARPPINEN et al., 2016; NORMAN et al., 1990; SIMKIN et al., 2003).

2.3.2.3 Polyphenole: Synthese, Funktion und Einflussfaktoren

Polyphenole stellen mengenmäßig eine bedeutende Gruppe pflanzlicher Inhaltsstoffe dar. Schätzungsweise 2% des photosynthetisierten Kohlenstoffs liegt in ihnen gebunden vor (ROBARDS und ANTOLOVICH, 1997). Strukturell leiten sich Polyphenole vom Phenol ab. Die Ausgangsstoffe, Phenylalanin und Tyrosin, werden über den Shikimatweg bereitgestellt (FRASER und CHAPPLE, 2011). Phenylalanin wird durch eine Deaminierungsreaktion, katalysiert durch die PAL, in Zimtsäure konvertiert. Über mehrere Zwischenschritte entsteht Tetrahydroxychalkon, das zu den Flavonoiden gezählt wird (CHOUHAN et al., 2017). Daneben können Phenolsäuren und Stilbenen gebildet werden (FRASER und CHAPPLE, 2011). Als zweiter Ausgangsstoff kann Tyrosin durch die TAL in p-Cumarinsäure konvertiert werden (KOZUKUE et al., 1979; WATTS et al., 2006), wobei dieser Weg aufgrund der geringeren Aktivität der TAL vermutlich kaum relevant ist (GUERRA et al., 2008; KOZUKUE et al., 1979; MONTERO et al., 1998). Ausgehend vom Tetrahydroxychalkon werden schätzungsweise mehr als 10.000 verschiedene Flavonoide synthetisiert (AGATI et al., 2012). Basierend auf der Position der Phenylgruppe am Pyranring wird zwischen Flavonoiden, Isoflavonoiden und Neoflavonoiden unterschieden (LOA et al., 2009). Gemäß der Modifizierung am C-Ring durch Dehydrogenierung, Hydroxylierung und Oxidation entstehen die bekannten Unterklassen: Flavone, Flavanole, Flavanone, Flavanonole, Flavonole und Anthocyane (Abbildung 2.26). Das Einführen verschiedener funktioneller Gruppen an unterschiedlichen Positionen im Molekül resultiert in einer hohen Vielfalt an Verbindungen (CHOUHAN et al., 2017; IWASHINA, 2015; VEITCH und GRAYER, 2011) mit unterschiedlichen biologischen Funktionen (DIXON und PAIVA, 1995).

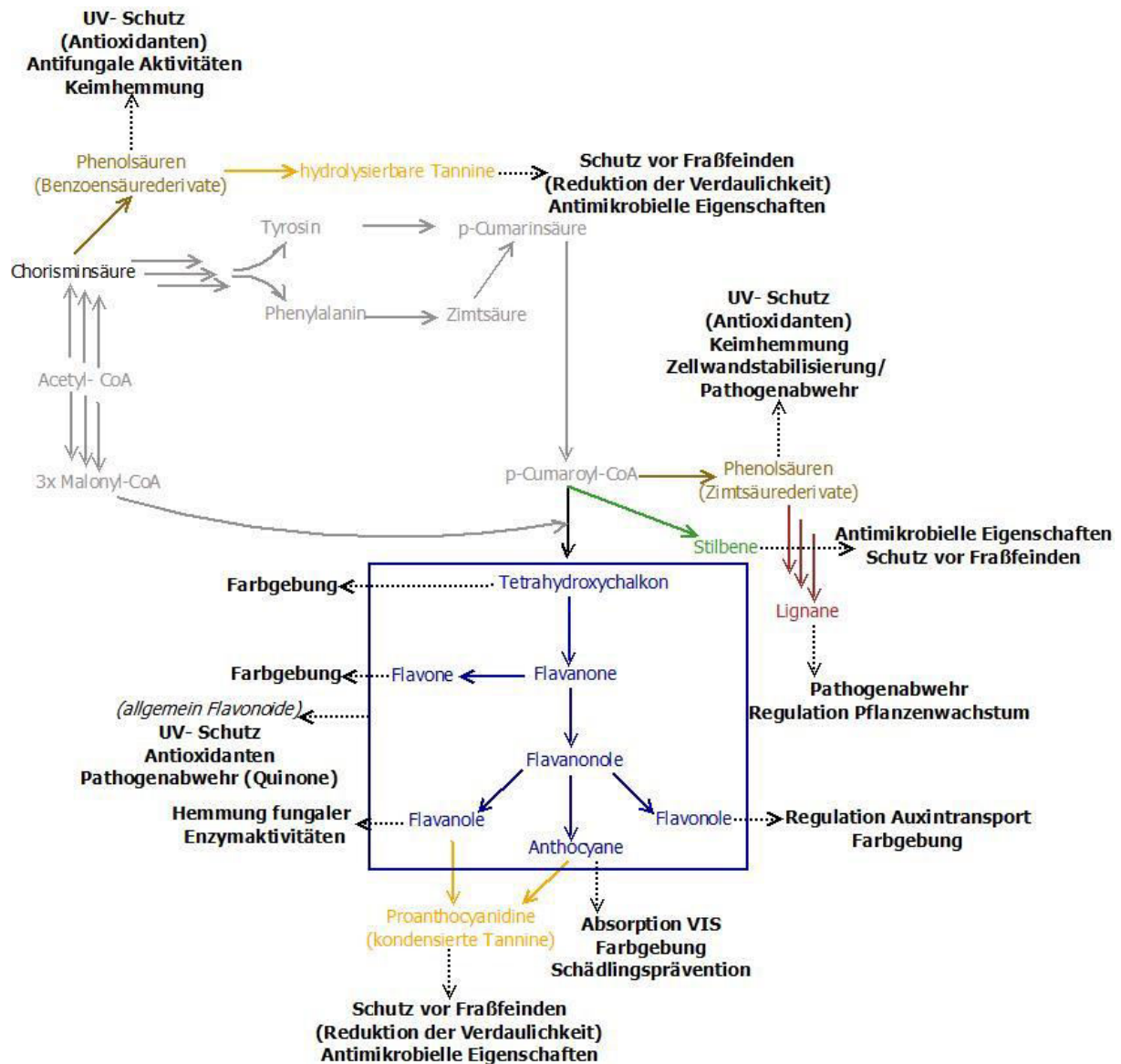


Abbildung 2.26: Polyphenolsynthese in Pflanzen und Überblick über ausgewählte Funktionen der einzelnen Untergruppen: Über den Shikimsäureweg werden die Ausgangsstoffe der Polyphenole, Phenylalanin und Tyrosin, bereit gestellt (FRASER und CHAPPLE, 2011); Deaminierung von Phenylalanin zu Zimtsäure, dann Oxidation zu p-Cumaroyl-CoA umgewandelt wird bzw. Konvertierung von Tyrosin zu p-Cumaroyl-CoA mit; Kondensation von p-Cumaroyl-CoA mit drei Molekülen Malonyl-CoA zu Tetrahydroxychalkon (CHOUHAN et al., 2017); p-Cumaroyl-CoA kann zudem verwendet werden für die Bildung von Phenolsäuren und Stilbenen (FRASER und CHAPPLE, 2011) (FRASER und CHAPPLE, 2011; KOZUKUE et al., 1979; WATTS et al., 2006); Umbau von Tetrahydroxychalkon in Flavonoiden, Isoflavonoiden und Neoflavonoiden (LOA et al., 2009); Modifizierungen am C-Ring durch Dehydrogenierung, Hydroxylierung und Oxidation führen zu den Untergruppen der Flavonoide: Flavone, Flavanone, Flavanonole, Flavonole und Anthocyane (CHOUHAN et al., 2017; IWASHINA, 2015; VEITCH und GRAYER, 2011)

Aufgrund der Vielzahl an **Funktionen** werden diese meist für einzelne Untergruppen der Polyphenole beschrieben. Am häufigsten beschrieben werden die Flavonoide, welche, wie auch die anderen Polyphenole, nicht als essentiell für das Pflanzenwachstum und -entwicklung angesehen werden (PEER und MURPHY, 2007).

Flavonoide absorbieren Strahlung im UV- und sichtbaren Bereich (210-600 nm) (LIKHANOV, 2014; LIN et al., 2012), bedingt durch Benzoyl- oder Benzene-Strukturen (LIN et al., 2012), Polyhydroxylierungen und Doppelbindungen in bestimmten Bereichen der Moleküle (CSEPREGI und HIDEK, 2018). Strukturelle Besonderheiten führen zu Unterschieden der Absorptionsbanden einzelner Flavonoidgruppen (LIKHANOV, 2014). Die Absorption von UV-Strahlen durch Flavonoide, welche häufig in den epidermalen Zellschichten von Blättern zu finden sind (BURCHARD et al., 2000), lassen eine Funktion als UV-Filter zum Schutz des darunterliegenden Mesophyllgewebes vermuten (KOLB et al., 2001; LI et al., 1993; REUBER et al., 1996; TAKAHASHI et al., 1991). Neben Flavonoiden absorbieren auch Phenolsäuren UV-Licht (BOOIJ-JAMES et al., 2002; LANDRY et al., 1995; LI et al., 1993; SHEAHAN, 1996; SOLOVCHENKO und MERZLYAK, 2008), während die schwachen Absorptionseigenschaften der Anthocyane im UV-Bereich aufgrund fehlender Acylierungen (WOODALL und STEWART, 1998), durch kovalente Modifikationen verbessert werden (GIUSTI et al., 1999; MORI et al., 2005; TATTINI et al., 2014). Anthocyane sind hingegen bedeutend für die Absorption des blau/ grünen Spektralbereich von ca. 490-550 nm (BURGER und EDWARDS, 1996; LIKHANOV, 2014). Dadurch konkurrieren sie mit Photosynthesepigmenten um Photonen (MERZLYAK und CHIVKUNOVA, 2000; PIETRINI et al., 2002; PIETRINI und MASSACCI, 1998; SMILLIE und HETHERINGTON, 1999), wobei mögliche Beeinträchtigungen der Photosyntheseleistung nicht belegt sind (KARAGEORGOU und MANETAS, 2006). Anthocyanreiche Blätter weisen jedoch Charakteristika auf, die für Schattenblätter üblich sind (TATTINI et al., 2014). Durch die starke Absorption des grünen Spektralbereichs wird zugleich die Lücke zwischen den Absorptionsbanden der photosynthetisch aktiven Pigmente geschlossen und verhindert, dass das grüne Licht tiefer in das Pflanzengewebe eindringt (MERZLYAK und GITELSON, 1995; VOGELMANN et al., 1991). Die Verringerung des Photonenangebots durch Absorption von UV-Licht und photosynthetisch relevanten Spektralbereichen wird mit einem Schutz der Zellmaschinerie vor direkten und indirekten Schäden, u. a. durch Überanregung des Photosyntheseapparats mit resultierendem photooxidativen Stress (EDREVA, 2005; FEILD et al., 2001; MERZLYAK und CHIVKUNOVA, 2000; PIETRINI et al., 2002; PIETRINI und MASSACCI, 1998; SMILLIE und HETHERINGTON, 1999) sowie eine Verringerung der Photoinhibition (BURGER und EDWARDS, 1996; FEILD et al., 2001; KROL et al., 1995; MENDEZ et al., 1999; PIETRINI et al., 2002) assoziiert. Durch die Absorption blauer und grüner Spektralbereiche kommt es ferner zu einer Rotfärbung von Blättern bzw. einer Maskierung der grünen Färbung (KELBER et al., 2003; PROKOPY und OWENS, 1983), wodurch die Blätter vor Fraßfeinden geschützt werden (KARAGEORGOU und MANETAS, 2006).

Polyphenole schützen nicht nur durch die Absorption bestimmter Spektralbereiche vor lichtinduzierten Schädigungen, sondern können auch ROS abfangen. Entscheidend sind Hydroxylgruppen in den Molekülen (AGATI et al., 2012; CSEPREGI und HIDEK, 2018). Die Bedeutung der antioxidativen Eigenschaften für die Pflanzen ist jedoch nicht geklärt (RICE-EVANS et al., 1995; TEIXEIRA et al., 2013) und wurden nur in wenigen Untersuchungen (AGATI et al., 2007; HERNÁNDEZ et al., 2006; TAKAHAMA, 1984, 1983) vor allem für Flavonoide (MELIDOU et al., 2005), Tannine (LOPES et al., 1999) und, in einem geringeren

Maße, für Phenolsäuren (NATELLA et al., 1999) beschrieben. Da Anthocyane vorwiegend in den Vakuolen lokalisiert und somit physikalisch getrennt sind von den wichtigsten Entstehungsorten reaktiver Sauerstoffspezies (HERNÁNDEZ et al., 2009), sind deren antioxidativen Eigenschaften vermutlich nur bei mechanischen Beschädigungen der Zellen von Bedeutung (GOULD et al., 2002). Bei der Reduktion der ROS entstehende Polyphenol-Oxidationsprodukte werden mit oxidativen Schädigungen anderer Membrankomponenten assoziiert (SAKIHAMA et al., 2002), können jedoch auch durch Ascorbate reduziert werden (MOHAMMADI und KAZEMI, 2002; TAKAHAMA, 2004).

Ferner werden Flavonole durch eine negative Beeinflussung des Auxin-Transports (BROWN et al., 2001; KUHN et al., 2011; PEER et al., 2004; PEER und MURPHY, 2007) mit der Regulation der Wurzelstreckung und Gravitropismus (BROWN et al., 2001) sowie einer verbesserten UV-Toleranz (JANSEN, 2001) assoziiert. Reaktive Quinone, vermehrt gebildet bei Verletzungen (BOSS et al., 1995; LAGRIMINI, 1991) und Schädlingsbefall (CONSTABEL et al., 2000), sollen eine Schutzfunktion gegenüber einem Befall von Mikroorganismen und Insekten darstellen (BOECKX et al., 2015; CHEN et al., 2000; CONSTABEL et al., 2000; LI und STEFFENS, 2002; MOHAMMADI und KAZEMI, 2002; POURCEL et al., 2007; WANG und CONSTABEL, 2004). Durch Hemmung fungaler Polygalakturonaseaktivitäten (AMBORABÉ et al., 2002; HUNTER, 1974; LAGO et al., 2004), dem Aufbau antimikrobieller Barrieren (FAULDS und WILLIAMS, 1999; REEM et al., 2016), einer Verringerung der Verdaulichkeit der Pflanzen (ROBBINS et al., 1987) und allgemein antibakteriellen bzw. antimikrobiellen Eigenschaften (BARBARY et al., 2010; CÉSPEDES et al., 2006; FAVELA-HERNÁNDEZ et al., 2012; FUNATOGAWA et al., 2004; HO et al., 2001; JEANDET et al., 2010; KARAGEORGOU und MANETAS, 2006) schützen verschiedene Polyphenole vor dem Befall mit Pathogenen.

Die **Beeinflussung** der Gehalte an Polyphenolen bzw. einzelner Untergruppen durch die Lichtbedingungen wurde in vielen Studien untersucht. Übereinstimmend wird bei allen betrachteten Pflanzenspezies eine lichtabhängige Induktion der Polyphenolsynthese beschrieben (AWAD et al., 2001; FORREST, 1969; LEYVA et al., 1995; PAGE et al., 2012; SHOJI et al., 2011; TAKEDA, 1990; TATTINI et al., 2004; VANDERAUWERA et al., 2005) mit einem starken Effekt auf Flavonoide (TATTINI et al., 2004), Flavonole (AWAD et al., 2001) und Anthocyane (AWAD et al., 2001; PAGE et al., 2012) und ohne Wirkung auf Zimtsäurederivate (TATTINI et al., 2004), Chalkone, Flavanole und Phenolsäuren (AWAD et al., 2001). Möglicherweise induziert ein verstärkter Photonenfluss oder eine verstärkte Bildung reaktiver Sauerstoffspezies bei höheren Lichtintensitäten eine Signalkaskade, resultierend in der Synthese antioxidativ wirksamer Substanzen (HUNG et al., 2008; LEYVA et al., 1995). Auf zellulärer Ebene werden vermutlich die Aktivitäten beteiligter Enzyme reguliert (CREASY, 1968; SHOJI et al., 2011; TAKEDA, 1990; VANDERAUWERA et al., 2005). Die Beeinflussung der Polyphenole durch die spektrale Lichtzusammensetzung lässt eine Beteiligung von Photorezeptoren vermuten. Nachgewiesen wurde ein positiver Einfluss von UV-Licht auf die Flavonoidsynthese bei mehreren Pflanzen (BIEZA und LOIS, 2001; FUGLEVAND, 1996; KOES et al., 1989; KOLB et al., 2001; WADE et al., 2001; WELLMANN et al., 1976), vermutlich begründet auf einer Induktion der Genexpression bzw. Aktivitätssteigerung beteiligter Enzyme (BIEZA

und LOIS, 2001; FUGLEVAND, 1996; KOES et al., 1989; WADE et al., 2001; WELLMANN et al., 1976) und der Hydroxylierung von Flavonolen (RYAN et al., 2002, 2001). Durch sichtbares Licht (VIS) wurde hingegen die Synthese von Zimtsäurederivaten (KOLB et al., 2001) und Proanthocyanidinen (KOYAMA et al., 2012) angeregt. Erhöhungen der Gehalte an Polyphenolen (DUTTA GUPTA und KARMAKAR, 2017; KIM et al., 2013; MANIVANNAN et al., 2015; SHIGA et al., 2009), Anthocyanen (STUTTE et al., 2009), Cichoriensäure (SHOJI et al., 2011; TAULAVUORI et al., 2016), Quercetin (EBISAWA et al., 2008) sowie Benzoe-, Zimtsäurederivaten und Flavonolen (KIM et al., 2015) in diversen Pflanzenspezies durch blaues Licht werden auf Aktivitäten von Cryptochromen (AHMAD et al., 1995; FUGLEVAND, 1996; WADE et al., 2001) und/ oder Phototropinen (KADOMURA-ISHIKAWA et al., 2013) zurückgeführt und beruhen vermutlich auf Steigerungen der Genexpressionen bzw. Aktivitäten beteiligter Enzyme (AHMAD et al., 1995; ATTRIDGE und SMITH, 1974, 1967; CREASY, 1968; EBISAWA et al., 2008; FUGLEVAND, 1996; NOH und SPALDING, 1998; SMITH und ATTRIDGE, 1970; WADE et al., 2001). Nur in wenigen Studien zeigte blaues Licht einen geringen Effekt auf den Polyphenolgehalt (JEONG et al., 2012; SHIGA et al., 2009).

Positive Wirkungen von Rotlicht auf die Gehalte an Polyphenolen (JEONG et al., 2012; MANIVANNAN et al., 2015), Anthocyanen (ATTRIDGE und SMITH, 1967; BEGGS et al., 1987; LANGE et al., 1971; MOHR und DRUMM-HERREL, 1983), Cichoriensäure (SHOJI et al., 2011), Quercetin (BEGGS et al., 1987), Ferulasäure (KIM et al., 2015) und Rosmarinsäure (SHIGA et al., 2009) werden auf phytochromevermittelte Signalkaskaden zurückgeführt, ebenfalls begründet auf Steigerungen der Expressionen bzw. Aktivitäten beteiligter Enzyme (ATTRIDGE und SMITH, 1967; BEGGS et al., 1987; FUGLEVAND, 1996; KOES et al., 1989; LANGE et al., 1971; MIAO et al., 2016; MOHR und DRUMM-HERREL, 1983; SMITH und ATTRIDGE, 1970; TAKEDA et al., 1988; WADE et al., 2001). Auch parallele Erhöhungen der Blau- und Rotlichtanteile werden mit höheren Polyphenolgehalten assoziiert (IWAI et al., 2010; JOHKAN et al., 2010; MANIVANNAN et al., 2015), ebenfalls beruhend auf höheren Enzymaktivitäten (ENGELSMA, 1974, 1968, 1967).

Lichtunabhängig werden Genexpressionen bzw. Aktivitäten der PAL gesteigert durch mechanische Verletzungen (LIANG et al., 1989; SINGH et al., 2009), Pilz- (LIANG et al., 1989) und Bakterieninfektionen (CHEN et al., 2000), Stickstoff- und Kaliummangel (TAN, 1980) sowie Temperaturreduktionen (AZUMA et al., 2012; LEYVA et al., 1995; PIETRINI und MASSACCI, 1998; TAN, 1980). Vermutlich kommt es zu Änderungen der Enzymaktivitäten (CHEN et al., 2000; JESS TOVAR et al., 2002; LEYVA et al., 1995; SINGH et al., 2009; TAMARI et al., 1995). Bei geringen Temperaturen führt zudem eine Verringerung der Photosynthesekapazitäten zu einem exzessiven Photonenfluss und einem Anstieg der ROS-Gehalte (SOMERSALO und KRAUSE, 1989).

2.3.3 Ausgewählte Mineralstoffe: Aufnahme und Funktionen

Im Folgenden werden die Aufnahme und Einflussfaktoren (2.3.3.1) sowie die Funktionen in der Pflanze (2.3.3.2) beschrieben um in der Diskussion mögliche Reaktionen auf die Lichtbedingungen zu erklären.

2.3.3.1 Aufnahme

Entscheidend für die Aufnahme und somit die Nutzung von Ionen ist deren Verfügbarkeit im Boden. Diese wird durch verschiedene Faktoren beeinflusst. Neben dem pH-Wert können Verhältnisse zwischen den Ionen entscheidend sein (LESTER et al., 2005; OTTOSEN et al., 2002). Die Bedeutung der Verhältnisse zwischen Kationen (K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+}) bzw. Anionen (NO_3^- , SO_4^{2-} , $H_2PO_4^-$) auf das Pflanzenwachstum wird dargestellt in der Steiner'schen Triangel (STEINER, 1980, 1961). Diesbezüglich können jedoch auch die Substrattemperatur und der PAR-Wert die Wechselwirkungen beeinflussen (CHU und TOOP, 1975). Weiterhin können sich verschiedene Faktoren fördernd bzw. hemmend auf die passive oder aktive Aufnahme von Ionen auswirken (Abbildung 2.27). Bei der aktiven Aufnahme über ionenspezifische oder unspezifische Ionenkanäle und –transporter (SAMAL et al., 2010) als Reaktion auf einen erhöhten Bedarf bei Wachstum und Biomassebildung (LIU et al., 2003) bzw. einer reduzierten passiven Aufnahme (TANGUILIG et al., 1987) wird eine Regulierung auf zellulärer Ebene vermutet. Kurzfristig kann die Aktivität der Ionenkanäle bzw. –transporter, langfristig deren Anzahl angepasst werden (CLARKSON, 1985). Als entscheidende Faktoren der Pflanzenentwicklung (siehe Abschnitt 2.2.3) werden Phytohormone als Mediatoren vermutet. Steigende Abscisinsäurekonzentrationen unter Stressbedingungen werden mit einer direkten Beeinflussung der Ionenaufnahme und einem verringerten Bedarf durch die Hemmung des Pflanzenwachstums zurückgeführt (MANZOOR ALAM, 1999). Zudem kann die Pflanze die Aufnahme durch das Absondern von Polysacchariden unterstützen, die die Bodenporosität beeinflussen, (CLARKSON, 1985) sowie durch organische Säuren, die die Mineralstofflöslichkeit erhöhen (JONES und DARRAH, 1994; SAMAL et al., 2010). Dies wurde unter anderem bei Eisen beobachtet, welches im Boden pH-Wert abhängig schlecht löslich vorliegt (BRIAT et al., 2007; HELL und STEPHAN, 2003) und vorwiegend in Fe^{3+} -Chelaten gebunden ist (HELL und STEPHAN, 2003; KAMPFENKEL et al., 1995). Mit Ausnahme der Gramineen, die eine alternative Strategie entwickelt haben, wird durch eine Exkretion von Protonen über eine Plasmamembran P-Typ ATPase (BRIAT et al., 2007; HELL und STEPHAN, 2003; KOBAYASHI und NISHIZAWA, 2012) und phenolische Substanzen (KOBAYASHI und NISHIZAWA, 2012) der pH-Wert des Bodens gesenkt und die Löslichkeit der Fe^{3+} -Chelate erhöht. Fe^{3+} -Chelate werden an der Wurzeloberfläche zu Fe^{2+} reduziert, katalysiert durch eine spezielle Chelatreduktase (BRIAT et al., 2007). Das besser lösliche Fe^{2+} wird anschließend durch spezifische Fe-Transporter in der Plasmamembran absorbiert (BRIAT et al., 2007; HELL und STEPHAN, 2003; KAMPFENKEL et al., 1995; KOBAYASHI und NISHIZAWA, 2012).

Die passive Aufnahme von Nährstoffen beruht auf Transpirationsströmen (NOVÁK und VIDOVIČ, 2003; OTTOSEN et al., 2002; SILBERBUSH et al., 2005; SILBERBUSH und BEN-ASHER, 2001), die durch steigende Lichtintensitäten (PONS et al., 2001), verringerte relative Luftfeuchtigkeiten (OTTOSEN et al., 2002) und steigende Temperaturen (GORHAM, 1987) erhöht werden. Auch Wind kann temperaturabhängig die Transpiration beeinflussen (DRAKE et al., 1970). Die Regulation der Transpiration beruht auf der Kontrolle des stomatären Schließmechanismus (OTTOSEN et al., 2002). Beobachtungen bei Salz- und Wasserstress lassen Abscisinsäure als Mediator vermuten (CHEN et al., 2001; KANG et al., 2005a; SCHRAVENDIJK und VAN ANDEL, 1985), bei Überschwemmungen können aber auch anaerobe Bedingungen im Rhizomenbereich relevant sein (MANZOOR ALAM, 1999). Die Beteiligung der Abscisinsäure ermöglicht eine Verbindung zu den Lichtbedingungen (siehe Abschnitt 2.2.3), da deren Konzentration unter anderem phytochromevermittelt durch eine Bestrahlung mit rotem Licht verringert wird (TOYOMASU et al., 1994; WEATHERWAX ET AL., 1996).

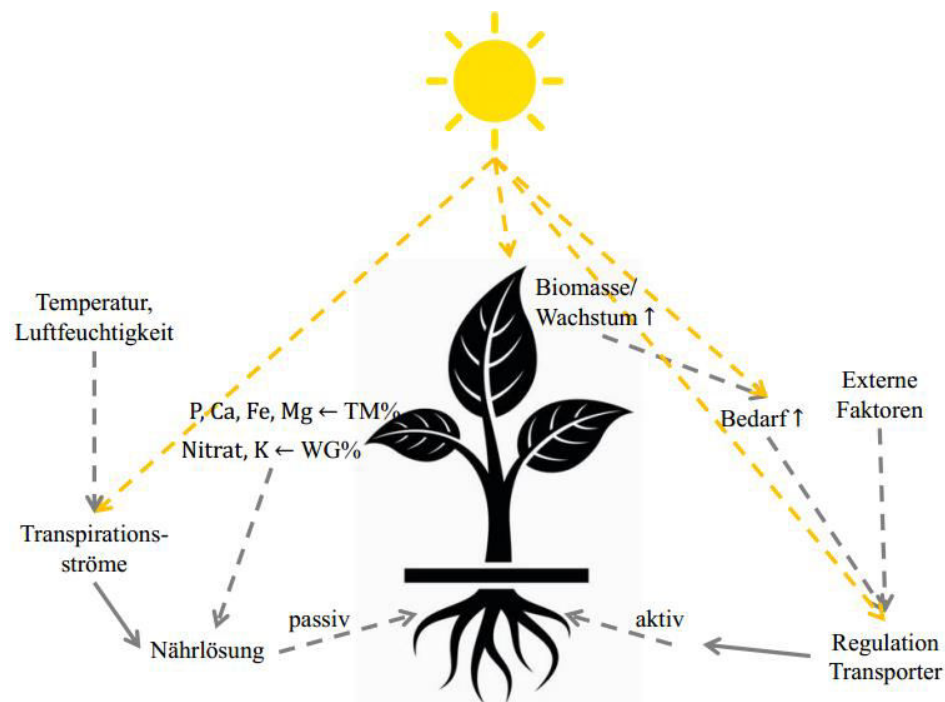


Abbildung 2.27: Schematische Darstellung der Beeinflussung von passiver und aktiver Mineralstoffaufnahme. Die passive Aufnahme beruht auf Transpirationsströmen (NOVÁK und VIDOVIČ, 2003; OTTOSEN et al., 2002; SILBERBUSH et al., 2005; SILBERBUSH und BEN-ASHER, 2001), die unter anderem durch Licht, Temperatur und Luftfeuchtigkeit beeinflusst werden (DRAKE et al., 1970; GORHAM, 1987; OTTOSEN et al., 2002; PONS et al., 2001). Aktiv werden Mineralstoffe über Transporter aufgenommen (SAMAL et al., 2010), die durch Bedarf und externe Faktoren, einschließlich den Lichtbedingungen, reguliert werden (LIU et al., 2003; MANZOOR ALAM, 1999).

Zusätzlich wird die Nährstoffaufnahme beeinflusst durch Wurzeloberfläche und –länge (HELL und STEPHAN, 2003; SAMAL et al., 2010), Wurzelhaare (CLARKSON, 1985; HELL und STEPHAN, 2003), pflanzenwachstumsfördernde Rhizobakterien und Mykorrhizapilze (ORDOOKHANI et al., 2010), sowie die Bodenbeschaffenheit und –zusammensetzung. Auch die Temperaturen der Bewässerung (SHARIF ZIA et al., 1994) und der Wurzelzone (CHU und TOOP, 1975; KABU und TOOP, 1970b; LAY ET AL., 2002; STOLTZFUS et al., 1998) können die Nährstoffaufnahme beeinflussen.

2.3.3.2 Funktionen der untersuchten Mineralstoffe

Bei den untersuchten Mineralstoffen handelt es sich um essentielle Nährstoffe, die aus dem Boden aufgenommen werden und spezifische Funktionen bei lichtabhängigen Prozessen haben.

Stickstoff ist ein essentieller Makronährstoff, der als Bestandteil von Aminosäuren, Nukleinsäuren, Photosynthesepigmenten und sekundären Pflanzeninhaltsstoffen (MAATHUIS, 2009), Pflanzenwachstum und –entwicklung (ANGUS und MONCUR, 1985; BIEMOND und VOS, 1992; MARTIN et al., 2002; WALTERS und REICH, 2000) sowie die Entwicklung von Samen (SINCLAIR und DE WIT, 1975) beeinflusst. Neben Ammonium ist für die meisten Pflanzen **Nitrat** die wichtigste Stickstoffquelle, da der hauptsächlich vorkommende organische Stickstoff in der Regel nicht direkt für Pflanzen verfügbar ist (DECHORG-NAT et al., 2011). Inwieweit Ammonium oder Nitrat präferiert aufgenommen wird, hängt dabei auch von den externen Bedingungen ab. Die Nitrataufnahme wird bei *Oryza sativa* unter anderem verstärkt bei höheren Temperaturen ($>15^{\circ}\text{C}$) und einem geringen Sauerstoffgehalt im Substrat aufgenommen, während die Aufnahme von Ammonium durch niedrige Temperaturen und Aeration gefördert wird (SASAKAWA und YAMAMOTO, 1978). Bei Vorliegen beider Stickstoffverbindungen im Substrat scheint es artspezifische Präferenzen zu geben. Bei *Oryza sativa* wurde eine bevorzugte Aufnahme von Ammonium beobachtet (SASAKAWA und YAMAMOTO, 1978), während bei Bäumen als dominierende Form der Stickstoffaufnahme Nitrat beobachtet wurde (NADELHOFFER et al., 1984). Das Vorhandensein von Ammonium im Substrat kann jedoch zu einer Reduktion des Nitratgehaltes in den Pflanzen führen (SANTAMARIA et al., 1997). Neben Wechselwirkungen mit Ammonium konnte auch ein positiver Zusammenhang zwischen der Aufnahme von Nitrat und Kalium beobachtet werden (KOCH und MENGEL, 1974).

Unabhängig vom Vorkommen anderer Ionen wird der Nitratgehalt in den Pflanzen bestimmt durch das Verhältnis zwischen Aufnahme und Assimilation (MATT et al., 2001). Aufgrund der hohen Konzentrationsunterschiede von Nitrat im Boden (SCHMIDT, 1956; TODD et al., 1975; WETSELAAR, 1961) haben Pflanzen ein System zur Regulation der Aufnahme entwickelt (DECHORG-NAT et al., 2011). Das Vorhandensein von Nitrat im Substrat bzw. Nährlösung führt zunächst durch die Induktion der Expression von Nitrattransportergenen (NAZOA et al., 2003; ZHUO et al., 1999) und einer Verlängerung der Seitenwurzeln (BUTTERY und STONE, 1988; DREW und SAKER, 1978) zu einer Steigerung der Aufnahme (SIDDIQI et al., 1989). Ein Anstieg des internen Nitratlevels bzw. der Reduktionsprodukte verringert die Nitrataufnahme (BRETELIER und NISSEN, 1982; CÁRDENAS-NAVARRO et al., 1999; CÁRDENAS NAVARRO et al., 1998; DE LA HABA et al., 1990; GLASS et al., 1985; INGEMARSSON et al., 1987; KING et al., 1992; LAINÉ et al., 1995; SIDDIQI et al., 1989) und trägt dadurch zur Aufrechterhaltung der Nitrathomöostase bei (CÁRDENAS NAVARRO et al., 1998). Die Nitrataufnahme kann auch durch wachstumsfördernde Bakterien gesteigert werden, welche die Expression der Nitrattransporter und eine Verlängerung der Seitenwurzeln auch bei guter Stickstoffversorgung erhöhen (MANTELIN und TOURAINE, 2004).

Funktionell ist Nitrat für die Pflanzen nicht nur Nährstoff relevant, sondern agiert auch als Signalmolekül. Durch die Beeinflussung von Genexpressionen und einer Vielzahl an Prozessen wird das Pflanzenwachstum (CRAWFORD, 2007), Wurzelsystem (LINKOHR et al., 2002; VIDAL et al., 2010), Blattentwicklung (RAHAYU et al., 2005), Keimruhe (ALBORESI et al., 2005), Kohlenstoff- und Stickstoffmetabolismus (SCHEIBLE et al., 1997), die Bildung sekundärer Pflanzeninhaltsstoffe (HARLEY et al., 1994) und Blütezeit (MARÍN et al., 2011) reguliert. Stickstoffmonoxid, Abbauprodukt des Nitrats, spielt eine Rolle bei der abscisinsäurevermittelten Stomataschließung (DESIKAN et al., 2002b). Im Vergleich zur Stickstoffspeicherung in Proteinen gilt die Akkumulation von Nitrat für die Pflanze als die energetisch günstigere Möglichkeit (MILLARD, 1988). Durch seine Akkumulation in den Vakuolen der Mesophyllzellen (MARTINOIA et al., 1981) wird Nitrat eine wichtige Rolle bei der Regulation des osmotischen Drucks zugesprochen (BLOM-ZANDSTRA und LAMPE, 1985; MCINTYRE, 1997; STEINGROVER et al., 1986). Dies ist insbesondere relevant bei geringen Lichtintensitäten, resultierend in einer suboptimalen Photosynthese und weniger gelösten Kohlenhydraten (BLOM-ZANDRASTRA und LAMPE, 1985). Vermutlich sind Akkumulationen von Nitrat bei schattigen Bedingungen (ATHMANN et al., 2011) und in Dunkelheit auf diese Funktion zurückzuführen. Tagsüber ist hingegen aufgrund einer ausreichenden Menge an photosynthetischen Produkten kein Nitrat für osmotische Funktionen erforderlich (BEHR und WIEBE, 1992; BLOM-ZANDSTRA und LAMPE, 1985; STEINGROVER et al., 1986). Auch wenn nachts ein höherer Nitratgehalt gefordert ist, führt ein höherer Bedarf bei Tag zu diurnalen Schwankungen der Nitrataufnahme (CÁRDENAS NAVARRO et al., 1998; CARRASCO und BURRAGE, 1992; LILLO, 1984; MATT et al., 2001; SCAIFE und SCHLOEMER, 1994; STEINGROVER et al., 1986). Beteiligt an der Regulation ist unter anderem Licht, welches die Aufnahme fördert (CHENG et al., 1992; SCAIFE und SCHLOEMER, 1994), beruhend auf einer Erhöhung der Transkriptionslevel der hochspezifischen Nitrattransporter NRT2 (MATT et al., 2001), an deren Regulation auch die Transkriptionsfaktoren HY5 beteiligt sind (CHEN et al., 2016). Eine Erhöhung der Nitrataufnahme durch Licht wird zudem mit einer Steigerung der Transpirationsraten und des Xylemtransport assoziiert (MATTSSON et al., 1988). Aufgrund einer stark reduzierten Nitratassimilation bei Nacht wird die Nitrataufnahme um ca. 40% reduziert (MATT et al., 2001). Wenige Stunden nach Beginn der Dunkelheit kann jedoch ein weiterer Peak beobachtet werden (LE BOT AND KIRKBY, 1992).

Die Nitratkonzentration wird zudem beeinflusst durch die Nitratassimilation. Die Nitratreduktase als Schlüsselenzym (CAMPBELL, 1988) leitet durch die Katalyse der Reduktion von Nitrat zu Nitrit (MELZER et al., 1989) den Stickstoffmetabolismus ein. Auch die Nitratassimilation zeigt einen diurnalen Rhythmus (BECKER et al., 1992; CARRASCO und BURRAGE, 1992; LEA et al., 2006; LILLO, 1984; MATT et al., 2001; SCAIFE und SCHLOEMER, 1994; STEINGROVER et al., 1986) mit einer höheren Transkription der Nitratreduktase tagsüber (LEA et al., 2006; LILLO, 1994, 1984; MATT et al., 2001), bedingt auf der gesteigerten Nitrataufnahme (CHEN et al., 2004; MELZER et al., 1989) und gefördert durch Lichtexposition (CHENG et al., 1992; MELZER et al., 1989; SCAIFE und SCHLOEMER, 1994). Vermutet wird eine Beteiligung von Phytochromen (BECKER et al., 1992; MÜLLER JONASSEN et al., 2008; RAO et al., 1980), die

eine positive Beeinflussung der Expression der Nitratreduktase durch die Transkriptionsfaktoren HY5 und HYH fördern (HUANG ET AL., 2015; MÜLLER JONASSEN ET AL., 2009b, 2008) und die negative Regulation durch PIF4 hemmen (MÜLLER JONASSEN et al., 2009a). Auch Photosynthate als Energiequelle sind für die Nitratreduktion erforderlich (ASLAM et al., 1979). Kurzfristig kann die Aktivität der Nitratreduktase durch einen Temperaturanstieg erhöht werden, während längerfristig hohe Temperaturen eine Inaktivierung des Enzyms induzieren und somit dessen Aktivität temperaturabhängig sinkt (HALLMARK und HUFFAKER, 1978).

Obgleich nachts bzw. in Dunkelheit sowohl die Aufnahme, als auch Assimilation von Nitrat reduziert wird, führt insbesondere die Hemmung des Stickstoffstoffwechsels zu einem Anstieg der Nitratkonzentration in Dunkelheit (ROBIN et al., 1999), bei Nacht (HALLMARK und HUFFAKER, 1978; SCAIFE und SCHLOEMER, 1994) und in der dunklen Jahreszeit (DAPOIGNY et al., 2000; KONSTANTOPOULOU et al., 2010).

Phosphor ist aufgrund von geringer Löslichkeit, geringer Diffusionsrate sowie einem hohen Fixierungsgrad an die Bodenmatrix schlecht für die Pflanzen verfügbar (SAMPLE et al., 1980). Es ist entweder an Mineralien (ADAMS und PATE, 1992; BÜNEMANN et al., 2012; SHEN et al., 2011) oder als Phytat gebunden. Die Verfügbarkeit hängt bei anorganischen Verbindungen ab von der Löslichkeit (BARTLETT und PICARELLI, 1973; DEVAU et al., 2009). In organischen Verbindungen wird die Freisetzung bedingt durch die Bodenfeuchtigkeit, Temperatur, Oberflächeneigenschaften, pH- und EC-Wert und beeinflusst durch Bodenorganismen, Mykorrhizapilze und Pflanzenwurzeln in Verbindung mit der Exkretion von Phosphatasen (GEORGE et al., 2005; HAYES et al., 2000; MACKAY und BARBER, 1984; RICHARDSON et al., 2001, 2000; SHEN et al., 2011). Zur Verbesserung von Verfügbarkeit bzw. Aufnahme können Pflanzen die Wurzelmorphologie, einschließlich Wurzellänge und Wurzelhaare, anpassen (BATES und LYNCH, 2000; BAYLIS, 1970; BONSER et al., 1996), Protonen zwecks pH-Wert-Absenkung sowie Carboxylate für einen Ligandenaustausch absondern oder durch Phosphatasen oder Phytasen das Phosphor für eine enzymkatalysierte Hydrolyse verfügbar machen (PEARSE et al., 2006; RICHARDSON et al., 2000; TARAHDAR und JUNGK, 1987; VENEKLAAS et al., 2003). Absorbiert wird Phosphor als H_2PO_4 - oder HPO_4^{2-} über hochaffine Transporter (SHEN et al., 2011). Die Speicherform von Phosphor in Pflanzen ist Phytat, das die Eigenschaft hat, Kationen wie Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ und Fe^{2+} zu chelatieren (MAATHUIS, 2009). In Blättern spielt die Speicherung als Phytat jedoch eine untergeordnete Rolle. Bei *Basella rubra* und *Ipomoea batatas* wird mit 4,5% bzw. 6,1% des Gesamtphosphates eine vergleichsweise geringe Menge als Phytat gespeichert (RAVINDRAN et al., 1994).

Phosphor kommt vor in Nukleinsäuren (CHAPIN und KEDROWSKI, 1983; FRIES, 1952) und Membranlipiden (CHAPIN und KEDROWSKI, 1983; FRIES, 1952; KNOWLES et al., 2001; NAKAMURA, 2013). Als Bestandteil von phosphorylierten Intermediaten im Energiestoffwechsel (FREDEEN et al., 1990; NIEMAN und CLARK, 1976; SHEN et al., 2011) ist Phosphor beteiligt an dem zellulären Energietransport. ATP setzt durch die Hydrolisierung der Pyrophosphatbindung 50 kJ mol^{-1} frei und spielt u.a. eine Rolle bei der Nukleinsäuresynthese (ALLEN und DUNAWAY-MARIANO, 2004; FRIES, 1952; LAHIRI et al., 2003;

VALIEV et al., 2003). Zudem ist Phosphor Bestandteil von Enzymen bzw. beeinflusst deren Aktivitäten (DUFF et al., 1989).

Beeinträchtigungen der Photosynthese bei Phosphormangel deuten auf direkte oder indirekte Funktionen des Mineralstoffes hin. In mehreren Studien wurde beobachtet, dass Phosphormangel zu einer Reduktion der Photosyntheserate führt (ELLSWORTH et al., 2015; HERNANDEZ et al., 2007; MAATHUIS, 2009; RAO und TERRY, 1995; REICH et al., 2009; RIPLEY et al., 2004; XU et al., 2007; ZHOU et al., 2009) bedingt durch Reduktion der stomatären Leitfähigkeit (THOMAS et al., 2006), der Ribulose-1,5-bisphosphate-Regenerationskapazität (REICH et al., 2009; RIPLEY et al., 2004; THOMAS et al., 2006) und verringerten Enzymaktivitäten im Calvin-Cyklus (DUFF et al., 1989; FREDEEN et al., 1990). Eine Verringerung der Chlorophyllkonzentration bei Phosphormangel wurde von CAI et al. (2012) beobachtet, während ÇAKMAK (1994) und MENÉNDEZ et al. (2002) keinen Zusammenhang feststellen konnten. Auch der Saccharosetransport (ÇAKMAK, 1994) sowie die Bereitstellung der energiereichen, phosphorhaltigen Verbindungen (DUFF et al., 1989; FREDEEN et al., 1990) werden nach aktuellem Stand nicht durch einen Phosphormangel beeinträchtigt. Höhere Phosphorgehalte werden hingegen mit einer höheren Elektronentransportaktivität und geringeren Verlusten in Form von Wärme assoziiert (RIPLEY et al., 2004; ZHOU et al., 2009). Dennoch wurde bislang kein Zusammenhang zwischen PAR-Wert und Phosphorgehalt festgestellt (GAUDILLERE und MOING, 1992; WILSON et al., 1990). Hohe Rot- und Blaulichtanteile bewirkten in Brokkolisprossen eine Erhöhung der Phosphorkonzentration (KOPSELL et al., 2014; KOPSELL und SAMS, 2013). In *Tagetes patula* wurde keine Veränderung durch unterschiedliche Lichtbedingungen beobachtet (SAMS et al., 2016). Ferner kam es in Blättern von Bäumen (*Larix laricina*, *Picea mariana*, *Betula papyrifera*, *Alnus crispa*) zu einer altersbedingten Abnahme der Phosphorkonzentrationen und einer prozentualen Verringerung bei steigenden Biomassen. Im Jahresverlauf wurde zudem eine Translokalisierung beobachtet, mit einer resultierenden Verringerung der Phosphorkonzentration (CHAPIN und KEDROWSKI, 1983).

Kalium ist als freies Ion in Pflanzen leicht beweglich. Über spannungsabhängige oder nicht-spannungsabhängige Kaliumkanäle mit meist geringer Kaliumaffinität werden die Ionen in die Zellen aufgenommen. Kaliumtransporter sind hingegen in der Regel durch eine hohe Affinität für Kalium definiert (DREYER und UOZUMI, 2011; GIERTH et al., 2005; GIERTH und MÄSER, 2007). Die Funktionen des Kaliums beruhen vorwiegend auf der Beeinflussung von mehr als 60 Enzymen (BLEVINS, 1985). Durch die regulatorische Funktion des Kaliums beim stomatären Schließmechanismus (HUMBLE und HSIAO, 1970, 1969) sowie auf die Aktivität der Ribulose-Biphosphat-Carboxylase wird die CO₂-Aufnahme beeinflusst (TEWARI et al., 2007). Folglich wird ein Kaliummangel mit einer Reduktion der photosynthetischen CO₂-Fixierung assoziiert, die in einem Überschuss an photosynthetisch produzierte Elektronen und der Bildung reaktiver Sauerstoffspezies resultiert. Als Cofaktor der Pyruvatkinase und Acetthio-kinase beeinflusst Kalium die Isoprenoidsynthese (TRUDEL und OZBUN, 1970) und ist als Aktivator der Succinyl-CoA-Synthetase involviert in der Porphyrinsynthese (BUSH, 1969). Zudem fördert Kalium die Aufnahme stickstoffhaltiger Verbindungen, deren Transport und die Aktivierung der Asparaginase,

wodurch der Proteinstoffwechsel beeinflusst wird (BLEVINS, 1985). Auch an der Schaffung des transmembranen Protonengradienten, der für die Photophosphorylierung von ADP genutzt wird, die Kalium beteiligt (AMTMANN et al., 2008).

Viele der Funktionen des Kaliums in der Pflanze sind mit dem Schutz vor oxidativem Stress verbunden. Die Steigerung der Photosyntheseeffizienz, u. a. durch eine Hemmung der NADPH-Oxidasen (CAKMAK, 2005), beugt der Entstehung reaktiver Sauerstoffspezies vor. Auch unter Stressbedingungen, z. B. Trocken-, Salz und Kältestress, können hohe Kaliumgehalte u. a. die Photosyntheserate hochhalten und die Entstehung von ROS durch die Übertragung der Lichtenergie auf Sauerstoff verhindern (WANG et al., 2013). Daneben wird Kalium mit einer erhöhten Toleranz gegenüber hohen Lichtintensitäten in Verbindung gebracht (CAKMAK, 2005), welche zu einer gesteigerten Kaliumaufnahme (GISLERØD und ADAMS, 1983) durch eine Anpassung der Transpirationsströme und Wurzelarchitektur (BALIGAR, 1985; CHEONG et al., 2007) führen. Die Kaliumaufnahme ist von externen Faktoren abhängig. Mehrere Studien beschreiben Korrelationen mit der Nitrataufnahme (DELAIRE et al., 2014; BLEVINS et al., 1974; MASSIMINO et al. 1981), wobei die Kaliumaufnahme zusätzlich jahreszeitlichen Schwankungen unterliegt (DELAIRE et al., 2014) und zeitverzögert bei einer Reduktion der Bestrahlungsstärke abnimmt (MASSIMINO et al. 1981). Analog zum Nitrat folgt die Kaliumaufnahme daneben einem diurnalen Rhythmus mit einem Maximum während des Tages und einem weiteren Peak wenige Stunden nach Beginn der Dunkelheit (LE BOT und KIRKBY, 1992; TALBOTT et al., 2006).

Magnesium liegt in der Pflanze meist komplexiert vor. Freie Ionen befinden sich nur in geringen Mengen im Cytosol. Neben einer Beteiligung an Proteinsynthese und Nukleotidstoffwechsel besetzt Magnesium eine Schlüsselrolle bei der Photosynthese (YAZAKI et al., 1988). Ein vielfach beobachteter Zusammenhang zwischen der Magnesiumverfügbarkeit und der Netto-Photosyntheserate (DIMASSI-THERIOU und BOSABALIDIS, 1997; DING et al., 2006; GUO et al., 2016a; HERMANS et al., 2004) lässt sich auf die vielschichtigen Aufgaben des Magnesiums zurückführen:

1. Magnesium ist das Zentralion der Chlorophyllmoleküle (VERBRUGGEN und HERMANS, 2013) und hat möglicherweise einen Einfluss auf die Absorptionsbanden des Chlorophylls (Lewitt, 1954).
2. Des Weiteren soll Magnesium für die Kontrolle der Verteilung der Anregungsenergie zwischen den Photosystemen I und II verantwortlich sein (MURATA, 1969).
3. Magnesium wird benötigt für die Grana-Thylakoidstapelung (HERMANS et al., 2004; RUMAK et al., 2010; STOITCHKOVA et al., 2006) und Ribosomenaggregation (SHAUL, 2002).
4. Magnesium moduliert Ionenströme durch Chloroplasten- und Vakuolenmembran und ist eventuell auch mitverantwortlich für das Ionengleichgewicht in den Zellen und die Regulation der Stomataöffnungen (SHAUL, 2002).
5. Magnesium beeinflusst die Aktivitäten vieler Enzyme, die an der Photosynthese beteiligt sind, wie beispielsweise der Ribulose-1,5-Bisphosphat-Carboxylase, Fructose-1,6-Bisphosphatase und diverser Pyrophosphatasen (CAKMAK und MARSCHNER, 1992; CAKMAK und YAZICI, 2010; GUO et al., 2016a; MEHNE-JAKOBS, 1996; SHAUL, 2002).

6. Zudem ist Magnesium beteiligt an der Synthese photosynthetisch wirksamer Pigmente durch Erhöhung entsprechender Enzymaktivitäten (CAKMAK und YAZICI, 2010; SCHOFIELD und PALIYATH, 2005). Die Aktivität der Mg-Chelatase wird durch Magnesium beeinflusst, welche den ersten Schritt der Chlorophyllbiosynthese katalysiert (PAPENBROCK et al., 2000). Durch Stabilisierung der negativ geladenen Pyrophosphate, Bestandteil des Geranylgeranylpyrophosphats, wird die Aktivität der Phytoene-Synthase, Schlüsselenzym der Carotinoidsynthese, durch Mg^{2+} stimuliert (SCHOFIELD und PALIYATH, 2005).
7. Durch seine Funktionen bei der Phloembeladung ist Magnesium wichtig für den Saccharosetransport aus den Blättern (GUO et al., 2016a; HERMANS et al., 2004; MEHNE-JAKOBS, 1996) und somit auch der Versorgung anderer Gewebe mit Photoassimilaten (CAKMAK und YAZICI, 2010; HERMANS et al., 2004). Eine Zuckerakkumulation in den Blättern ist mit einem Rückgang der CO_2 -Fixierung (DING et al., 2006) und einer reduzierten Verwendung der absorbierten Lichtenergie in der photosynthetischen Elektronentransportkette verbunden, resultierend in einer Überreduktion (CAKMAK und KIRKBY, 2008; HERMANS et al., 2004; YANG et al., 2012)

Als Cofaktor oder allosterischer Modulator von mehr als 300 Enzymen beeinflusst Magnesium die Aktivität von Carboxylasen, Phosphatasen, Kinasen, RNA Polymerasen und ATPasen (COWAN, 2002; HAWKESFORD et al., 2011; SHAUL, 2002; VERBRUGGEN und HERMANS, 2013) und ist als Modulator bzw. Cofaktor der Stickstoffreduktase, Glutamatsynthase, Glutamatdehydrogenase und Transaminasen (YIN et al., 2009) an der Proteinsynthese beteiligt (CAKMAK und YAZICI, 2010). Weiterhin soll Magnesium durch Regulation von Genexpressionen die Ethylenbiosynthese, ROS-Detoxifizierung, Photoprotektion, ABA-Reaktionen und den Tagesrhythmus beeinflussen (DAVID-ASSAEL et al., 2006; HERMANS et al., 2010b, 2010a; NIU et al., 2014). Bei Trockenstress wird eine Beteiligung an der Hemmung von Chloroplastenreaktionen vermutet (RAO et al., 1987).

Die Aufnahme von Magnesium wird beeinflusst durch die Verfügbarkeit anderer Kationen wie Kalium (DIEM und GODBOLD, 1993; DING et al., 2006; HEENAN und CAMPBELL, 1981; KABU und TOOP, 1970a, 1970b; RÖMHELD und KIRKBY, 2007), Aluminium (BOSE et al., 2013; RÖMHELD und KIRKBY, 2007), Calcium (DIEM und GODBOLD, 1993; JACOBY, 1961; RÖMHELD und KIRKBY, 2007) und Ammonium (RÖMHELD und KIRKBY, 2007).

Ein Zusammenhang mit dem Licht ist hingegen nicht geklärt. Verringerte Magnesiumgehalte in Auberginenblättern während längerer Dunkelperioden (MURAGE et al., 1996) und ein steigender Magnesiumbedarf bei steigenden PAR-Werten (CAKMAK und KIRKBY, 2008) kann möglicherweise eine vorbeugende Maßnahme darstellen, da eine adäquate Magnesiumversorgung vor der Entstehung reaktiver Sauerstoffspezies schützt, die durch eine Beeinträchtigung des photosynthetischen Elektronentransports und der Verwendung von Photoassimilaten bei Magnesiummangel entstehen (CAKMAK und MARSCHNER, 1992; MARSCHNER und CAKMAK, 1989). Positive Effekte wurden durch Bestrahlung mit blauen Spektralbereichen in Brokkolisprossen (KOPSELL et al., 2014; KOPSELL und SAMS, 2013) und Ringelblumen (SAMS et al., 2016) beobachtet. Rotes Licht wurde ebenfalls mit einer Erhöhung des Magnesiumgehalts

in Ringelblumen (SAMS et al., 2016) in Zusammenhang gebracht, während grünes Licht die positive Wirkung des Blaulichts in Brokkolisprossen verringerte (KOPSELL et al., 2014).

Calcium-Ionen (Ca^{2+}) bilden durch ihre positive Ladung Komplexe mit negativ geladenen Gruppen von Phospholipiden, Proteinen und Zuckern und sind aufgrund ihrer Lokalisierung in Zellwänden und –membranen wichtig für die Membranintegrität und Zellwandstabilität (MAATHUIS, 2009; PINEROS und TESTER, 1997). Die geringen Konzentrationen an freien Calciumionen im Cytoplasma haben regulatorische Funktionen (LIANG et al., 2009; MCAINSH und PITTMAN, 2009) und werden durch Ozon (EVANS et al., 2005), Kälte (ALLEN et al., 2001; ERLANDSON und JENSÉN, 1989; MCAINSH und PITTMAN, 2009; MONROY und DHINDSA, 1995; RINCON und HANSON, 1986), Hitze (KLEIN und FERGUSON, 1987; LARKINDALE und KNIGHT, 2002; ZHAO und TAN, 2005), osmotischen (LYNCH und LAUCHLI, 1998) und oxidativen Stress (CASTILLO und HEATH, 1990; LONG und JENKINS, 2007; MARRE et al., 1998; MCAINSH et al., 1996; RENTEL und KNIGHT, 2004), Anoxie (SUBBAIAH et al., 1994), mechanischen Stress (JONES und MITCHELL, 1989), Trockenheit (CHEONG et al., 2007) und bestimmte Lichtbedingungen (KREIMER et al., 1988; ZHAO und TAN, 2005) durch einen Calciuminflux aus dem extrazellulären Raum oder intrazellulären Speichern erhöht. Auch Abscicinsäure (CHEONG et al., 2007) kann durch eine Bildung von Wasserstoffperoxid den Calciumeinstrom ins Cytoplasma steigern (ALLEN et al., 2001, 1999; CHEONG et al., 2007; MCAINSH et al., 1992; MCAINSH und PITTMAN, 2009; WEBB und HETHERINGTON, 1997). Untersuchungen mit *Arabidopsis* zeigten zudem eine blaulichtinduzierte, phototropin-vermittelte Regulation der Calciumaufnahme vom Apoplast ins Cytoplasma (BABOURINA et al., 2002). Auch durch eine Bestrahlung mit rotem Licht wird ein Calciuminflux in das Cytosol induziert, gefolgt jedoch von einem Abfall unterhalb des Ruhepegels. Daraus wird abgeleitet, dass Calcium als Botenstoff in phytochromevermittelten Prozessen fungiert (SHACKLOCK et al., 1992). In Folge werden durch Transmitter nachgeschaltete Reaktionen angeregt, die dem Schutz der Pflanze und der Adaption an Umweltbedingungen dienen (KNIGHT, 2000). Unter anderem werden Ca^{2+} -abhängige (De)phosphorylierungen angeregt (MINORSKY und SPANSWICK, 1989), Genexpressionen beeinflusst (BERBERICH und KUSANO, 1997; CHRISTIE und JENKINS, 1996; MONROY und DHINDSA, 1995; POLISENSKY und BRAAM, 1996), Enzyme aktiviert (KREIMER et al., 1988; RASMUSSEN et al., 2002; RENTEL und KNIGHT, 2004; SIDDIQUI et al., 2012; SUBBAIAH et al., 2000), thigmomorphogenetische Veränderungen (JONES und MITCHELL, 1989; MILLET und PICKARD, 1988), und der Turgor reguliert (BISSON et al., 1995; OKAZAKI et al., 2002; OKAZAKI und IWASAKI, 1991), die Lipidperoxidation von Zellmembranen reduziert (SIDDIQUI et al., 2012) und der Kaliumtransportprozess in den Wurzeln und Schließzellen reguliert (CHEONG et al., 2007). Auch eine calciumabhängige Induktion der Zellapoptose konnte beobachtet werden (ERMAK und DAVIES, 2001). Über Calciumsensoren sind Veränderungen der Calciumkonzentration zudem an der Hemmung der Stomataöffnung bzw. Unterstützung der Stomataschließung in den Schließzellen beteiligt. Kurzfristig kann dies durch die Erhöhung der Calcium-Konzentration im Cytosol der Schließzellen ausgelöst werden, längerfristig durch Schankungen der Calcium-Cytosolkonzentration mit einer definierten Frequenz, Dauer, Anzahl und Höhe (ALLEN et al., 2001; CHEONG et al., 2007; MCAINSH et al.,

1996; MCAINSH und PITTMAN, 2009; RENTEL und KNIGHT, 2004). Calcium ist zudem beteiligt an der Regulation der Photosynthese, auch in Abhängigkeit von der Tageszeit. Der dunkelheitinduzierte Einstrom von Calcium ins chloroplastische Stroma scheint an der Wahrnehmung von Licht-/Dunkel-Übergängen sowie bei Photoperioden beteiligt zu sein (SAI und JOHNSON, 2002). Bei Licht hemmt Calcium die Chlorophyllanreicherung und stimuliert zusätzlich den Abbau von neu gebildetem Chlorophyll (TANAKA und TSUJI, 1980). Als Calciumoxalat mit reflektierenden Eigenschaften soll Calcium hingegen die Lichtverteilung in den Palisadenzellen unterstützen (KUO-HUANG et al., 2007).

Enzymaktivierende Funktionen hat Calcium bezüglich der Fructose-1,6-Bisphosphatase, einem Schlüsselenzym bei der photosynthetischen CO₂-Assimilation (HERTIG und WOLOSUK, 1983; KREIMER et al., 1988) und der NAD⁺-Kinase (BRAND und BECKER, 1984), die NADP⁺ für die photosynthetische Reduktion zu NADPH zur Verfügung stellt (MUTO et al., 1981). Ferner wurden Ca²⁺-induziert Aktivierungen von Peroxidasen (RASMUSSEN et al., 2002), Glutamatdecarboxylasen (SNEDDEN et al., 1995, 1996), Glutathion-S-Transferasen (RENTEL und KNIGHT, 2004) und NADPH-Oxidasen (MARRE et al., 1998) beobachtet. Ca²⁺-regulierte Kinasen und Phosphatasen sind involviert in die Regulation des Actinnetzwerks (GRABSKI et al., 1998). Ausgelöst durch UV-B Strahlung reguliert Calcium die Genexpression der Chalkonsynthese (CHRISTIE und JENKINS, 1996).

Das aufgenommene *Eisen* ist in freier Form hochreaktiv und führt u. a. zur Bildung von Hydroxyradikalen (RAVET und PILON, 2013). Deswegen wird Eisen, sofern nicht in funktionellen Strukturen eingebunden, durch Nicotinamid chelatiert (BRIAT et al., 2007; HELL und STEPHAN, 2003; KOBAYASHI und NISHIZAWA, 2012), durch Citrate (BRIAT et al., 2007; KOBAYASHI und NISHIZAWA, 2012) und Mugeinsäuren (KOBAYASHI und NISHIZAWA, 2012) komplexiert oder in Ferritin gespeichert (HELL und STEPHAN, 2003; RAVET und PILON, 2013). Reguliert wird dies u. a. durch Abscicinsäure, deren Konzentration bei einem Eisenüberschuss ansteigt und den Einbau von Eisen in Ferritin fördert. Vermutlich gibt es aber auch einen absicinsäureunabhängigen Ferritinbiosynthese-weg (BRIAT et al., 2007).

In den Zellen ist etwa 70-90% des zellulären Eisens in den Chloroplasten lokalisiert (SOLTI et al., 2012; TERRY und LOW, 1982). Aufgrund seiner Funktion als Cofaktor vieler funktioneller Strukturen, unter anderem als nicht-Heme-Eisen gebunden an Polypeptide und eingebaut in Heme-Strukturen und Eisen-Schwefelcluster (HELL und STEPHAN, 2003; RAVET und PILON, 2013), ist Eisen beteiligt an der Photosynthese, Atmung und Chlorophyllsynthese (KOBAYASHI und NISHIZAWA, 2012) und stellt qualitativ und quantitativ das wichtigste Metall bei der Photosynthese dar (RAVET und PILON, 2013). Folglich befindet sich Eisen vorwiegend in den Photosystemen und Komponenten der Elektronen-transportkette (KURISO et al., 2003; VASSILIEV et al., 2001), in denen es als Hemeprotein-Untereinheit im PSII, als 4Fe-4S Clusterproteine im PSI (RAVET und PILON, 2013), als Hemeproteine im Cytochrome b6/f und als (2Fe-2S) Clusterproteine im Ferredoxin gebunden ist (LEVITT, 1954; RAVET und PILON, 2013). Aufgrund seiner Eigenschaft, Elektronen aufnehmen und abgeben zu können, ist Eisen wichtig für den photosynthetischen Elektronentransport (BRIAT et al., 2007; ROCHAIX, 2011). Als Bestandteil vieler Me-

talloproteine ist Eisen beteiligt an den meisten grundlegenden Redoxreaktionen des Sauerstoff-abhängigen Stoffwechsels (BRIAT et al., 2007) und in Form von Nitratreduktase, Nitritreduktase, Glutaminsynthetase, Adenosinphosphosulfatreduktase und Sulfitreduktase an der Nitrat- und Schwefelassimilation. Auch die Synthesewege von Chlorophyll, Heme und Siroheme sind lokalisiert in den Chloroplasten und involvieren verschiedene Fe-Proteine (BRIAT et al., 2007; HELL und STEPHAN, 2003; RAVET und PILON, 2013). Zu weiteren wichtigen Enzymen mit Eisen als Cofaktor zählen die Katalase und Superoxiddismutase, die den Abbau radikaler Sauerstoffspezies unterstützen (LEVITT, 1954; RAVET und PILON, 2013; VANDENABEELE et al., 2004). Weiterhin gibt es zahlreiche enzymatische Reaktionen, an denen Eisen beteiligt ist, wie die DNA-, Hormon- (BRIAT et al., 2007) und Ethylensynthese (HELL und STEPHAN, 2003). Ferredoxin ist zudem ein Cofaktor der Heme-Oxygenase, die durch eine oxidative Spaltung von Heme die Synthese des Bilin-Chromophors einleitet (LI et al., 2011a).

Durch die Beteiligung an allen wichtigen Photosynthesekomplexen hat Eisen eine zentrale Bedeutung für die Aufrechterhaltung des Chlorophyllgehalts (TAYLOR et al., 1982; TERRY, 1980), der photochemischen Kapazität (SPILLER und TERRY, 1980; TAYLOR et al., 1982) sowie den Elektronentransport, die Kohlenstofffixierung und die Funktionalität des PSI (ROCHAIX, 2011). Als Bestandteil der Katalase ist Eisen relevant für das Pflanzenwachstums und die Produktivität, auch unter Stressbedingungen (VANDENABEELE et al., 2004), wodurch es bei Eisenmangel zu Ernteverlusten und Qualitätsverringern kommt (HELL und STEPHAN, 2003). Ein Eisenüberschuss kann ebenfalls zu Funktionsverlusten führen durch verminderte Photosyntheseraten und Photoinhibition. Als Alternative der Dezimierung von Elektronen bei Eisenüberschuss wird die Photorespiration gesteigert und die Gehalte an Ascorbat und Glutathion verringert (KAMPFENKEL et al., 1995; PEREIRA et al., 2013).

2.4 Bedeutung der Inhaltsstoffe für die menschliche Ernährung

„A vitamin is a substance that makes you ill if you don't eat it“
(Albert Szent-Gyorgyi, zitiert nach RODRIGO ET AL. (2010))

Die in Abschnitt 2.3 beschriebenen Inhaltsstoffe sind nicht nur für pflanzenphysiologische Prozesse relevant, sondern als Mikronährstoffe bedeutend für die Humanernährung. Mineralstoffe und Vitamine gehören zu essentiellen Nährstoffen. Polyphenole und Carotinoide ohne Provitamin A-Wirkung haben den Vitamin-Status nicht, werden aber mit gesundheitsfördernden Eigenschaften assoziiert.

2.4.1 Oxidativer Stress beim Menschen

Von großem Interesse sind aktuell die antioxidativen Eigenschaften pflanzlicher Inhaltsstoffe, da die Entstehung vieler Krankheiten mit oxidativem Stress assoziiert wird. Oxidativer Stress bei Menschen ist eine unvermeidbare Konsequenz des Zellmetabolismus. In den Mitochondrien entstehen reaktive

Sauerstoffspezies (ROS) als Nebenprodukt des aeroben Stoffwechsels und können durch Reaktionen mit anderen Metaboliten der Bildung weiterer reaktiver Sauerstoffspezies dienen oder werden durch antioxidativ-wirksame Enzyme unschädlich gemacht (LENAZ, 2001). Ein weiterer Entstehungsort sind die Phagocyten, in denen NADPH-Oxidasen ROS als Abwehrmechanismus gegen eindringende Pathogene bilden (BABIOR, 2000; MOREL et al., 1991; XIA und ZWEIER, 1997).

Vergleichsweise unwichtig ist beim Menschen das Singulett-Sauerstoff (CADENAS und SIES, 1984), dass mit lichtbedingten Hautalterung und -schäden (KRUTMANN, 2000; TERAOKA et al., 2011), Proteinschädigungen (LINETSKY und ORTWERTH, 1997), Altersstar (ZIGLER und GOOSEY, 1984) und postischämischen Reperfusionsschäden (ZHAI und ASHRAF, 1995) assoziiert wird.

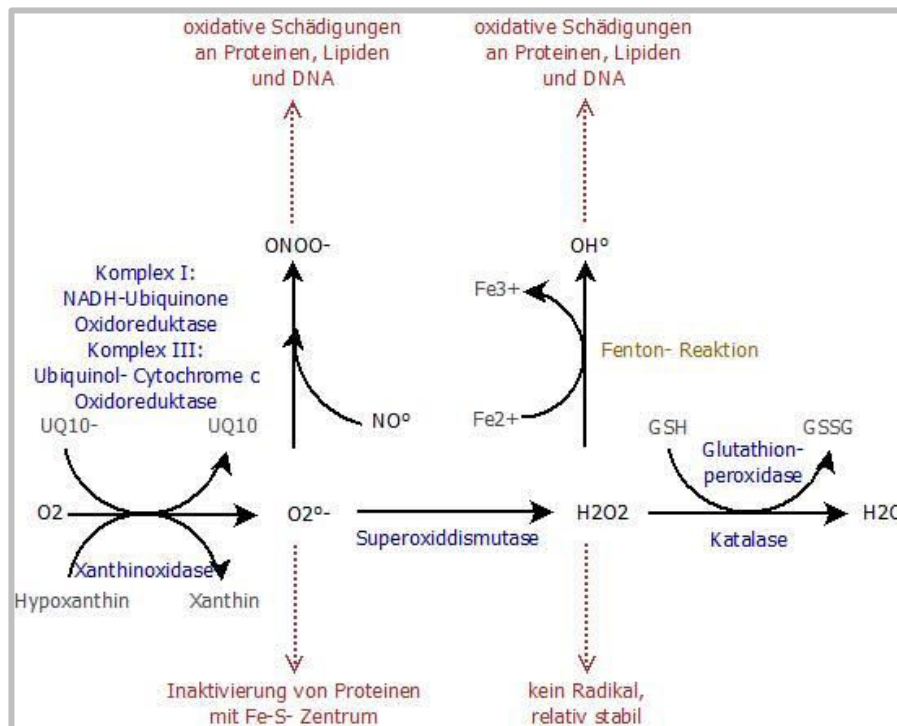


Abbildung 2.28: Bildung reaktiver Sauerstoffspezies in den Mitochondrien; In den Mitochondrien wird Superoxid ($O_2^{\bullet -}$) entweder enzymatisch (Xanthinoxidase) oder nicht-enzymatisch (in den Komplexen I und III mit UQ_{10} (Ubisemiquinone) als Elektronendonator) gebildet. Dieses kann über Superoxiddismutasen in Wasserstoffperoxid (H_2O_2) umgewandelt werden oder durch eine Reaktion mit Stickstoffmonoxid (NO^\bullet) zu Peroxynitrit ($ONOO^-$) reagieren. Wasserstoffperoxid wird durch antioxidant-wirkende Enzyme Katalase oder Glutathionperoxidase in Wasser (H_2O) überführt. Durch die Fenton-Reaktion ist auch die Bildung von Hydroxylradikalen (OH^\bullet) möglich; Blau gekennzeichnet sind beteiligte Enzyme, Rot: Wirkungen der Metabolite; Quellen und Inspirationen: RAHA und ROBINSON (2000); SZABÓ und OHSHIMA (1997)

Superoxid kann zu Schädigungen an Enzymen mit katalytisch aktiven ($4Fe-4S$) – Cluster führen (FLINT et al., 1993; PRYOR und SQUADRITO, 1995). DNA-Schädigungen sind vermutlich ausgeschlossen (HALLIWELL und ARUOMA, 1991). Als Reaktionspartner des Stickstoffmonoxid ist Superoxid beteiligt an der Bildung von Peroxynitrit, das bei verschiedenen Wirkungsorten (BECKMAN und KOPPENOL, 1996; INOUE und KAWANISHI, 1995; MACFADYEN et al., 1999; PACHER et al., 2007) mit oxidativen Schädigungen an Lipiden, Proteinen und DNA sowie Nitrationen von Tyrosinresten in Proteinen assoziiert wird (CHAKI et al., 2009; VANDELLE und DELLEDONNE, 2011). Wasserstoffperoxid hat hingegen nur eine

schwach oxidative Wirkung (RAHA und ROBINSON, 2000). Über die Fenton-Reaktion werden jedoch Hydroxyradikale gebildet (FILHO et al., 1984; HALLIWELL und ARUOMA, 1991; IMLAY et al., 1988). Diese weisen, gemeinsam mit Sulfat- ($\text{SO}_4^{\cdot-}$), Benzoyloxyl- und Alkoxyradikalen (KAWANISHI et al., 2001) sowie Peroxynitrit eine hohe oxidative Aktivität gegenüber der DNA auf. Unter normalen Umständen verfügen Zellen über Mechanismen, um geschädigte DNA zu reparieren (KASAI, 1997; KAWANISHI et al., 2001; WANG et al., 1998). Eine mangelhafte Reparatur kann jedoch zu fehlerhaften Replikationen führen, die wiederum in Mutationen wie GC \rightarrow TA Tranversionen (POULSEN et al., 1998; SZABÓ und OHSHIMA, 1997), Einzel- und Doppelstrangbrüchen (EPE et al., 1988; INOUE und KAWANISHI, 1995; KRYSTON et al., 2011), sowie Chromosomenanomalien (HALLIWELL und ARUOMA, 1991) und DNA-Protein-Vernetzungen (WANG et al., 1998) resultieren. Auch oxidative Schädigungen von Proteinen können eine Beeinträchtigung von Enzymfunktionen bedeuten (BUTTERFIELD et al., 1998). Durch ROS ausgelöste Lipidperoxidationen (HALLIWELL und CHIRICO, 1993; PAMPLONA, 2008) in Membranen beeinträchtigen die Membranfunktion, verändern deren Fluidität, inaktivieren membran-gebundene Rezeptoren und Enzyme und steigern die nicht-spezifische Permeabilität für Ionen (CHEN und PAL YU, 1994; CHIO und TAPPEL, 1969; HALLIWELL und CHIRICO, 1993; PAMPLONA, 2008).

Während unter normalen Umständen nur geringe Mengen an Superoxiden gebildet, bzw. diese durch Superoxiddismutasen entfernt werden (RAHA und ROBINSON, 2000), begünstigen verschiedene Faktoren die Bildung. Endogen fördern das Proteohormon Leptin (BOULOUMIE et al., 1999), Entzündungs- und Krebszellen (FEDERICO et al., 2007), Bewegung (MIYAZAKI et al., 2001; POWERS et al., 2011) sowie Aktivitäten pro-oxidativ bzw. Unterfunktionen anti-oxidativ wirksamer Enzyme (FEDERICO et al., 2007; LANDMESSER et al., 2002) die Bildung von ROS, die jedoch auch als Signalübermittler (BOULOUMIE et al., 1999), zur Abwehr eindringender Mikroorganismen (BABIOR, 2000) oder der kontrollierten Zellapoptose (CARNEVALI et al., 2015; VENTO et al., 2000) gezielt gebildet werden. Exogen begünstigen elektromagnetische (DE IULIIS et al., 2009), UV- und Infrarotstrahlung (DARVIN et al., 2010; KATIYAR et al., 2001), Ozon (CORRADI et al., 2002; CROSS ET AL., 1992), Luftverschmutzung (LI et al., 2003), Virusinfektionen (GONG et al., 2001), Pestizide (ABDOLLAHI et al., 2004; RANJBAR et al., 2002) und Zigarettenrauch (CARNEVALI et al., 2015; VAN DER VAART et al., 2004) die Bildung von ROS. Zigarettenrauch liefert mit Stickstoffmonoxid zudem einen Reaktionspartner für die Synthese von Peroxynitrit (MÜLLER et al., 1997; PRYOR und SQUADRITO, 1995) und wird mit einer verstärkten Lipidperoxidation sowie Oxidationen von Plasmaproteinthiolen und Albumin-gebundenen Bilirubin assoziiert, wodurch insbesondere der Bedarf an Ascorbinsäure steigt (FREI et al., 2015).

Oxidative Schädigungen verschiedener Zellkomponenten werden als ein Schlüsselphänomen bei chronischen Krankheiten angesehen (DHALLA et al., 2000; PHANIENDRA et al., 2015). Basentransversionen werden mit der Entstehung von Krebs in Zusammenhang gebracht (FEDERICO et al., 2007; HOLLSTEIN et al., 1991; KAWANISHI et al., 2001; KRYSTON et al., 2011; SZABÓ und OHSHIMA, 1997; WANG et al., 1998). Artherosklerose wird hingegen vorwiegend mit Lipidperoxidationen assoziiert (DARLEY-USMAR et al., 1992; HALLIWELL und CHIRICO, 1993; LEEUWENBURGH et al., 1997; SCHWARTZ et al., 1991;

SMITH et al., 1992). Weiterhin werden neurogenerative Erkrankungen wie Parkinson (HWANG, 2013) und Alzheimer (BUTTERFIELD et al., 2006), Asthma (LI et al., 2003) und Herzversagen (CHEN et al., 2011; GIORDANO, 2005) unter anderem auf oxidativen Stress zurückgeführt.

2.4.2 Funktionen der Inhaltsstoffe im Körper und Aufnahmeempfehlungen

Um einer schädigenden Wirkung reaktiver Sauerstoffspezies vorzubeugen, hat der Körper verschiedene Schutzmechanismen entwickelt (KRYSTON et al., 2011), bestehend aus körpereigenen Antioxidanten und Enzymen. Des Weiteren werden über die Ernährung Substanzen mit antioxidativen Eigenschaften aufgenommen. Diesen werden wichtige Funktionen bei der Prävention von Krebs, Artherosklerose und anderen chronischen Krankheiten zugesprochen (BLOMHOFF et al., 2006; BOWMAN, 2012; CHEN et al., 2018; COX ET AL., 2000; JOSHIPURA et al., 1999; STRANDHAGEN et al., 2000) und sind mit Vitamin A bzw. Provitaminen, Vitamin C und E, sowie antioxidativ wirksamen Polyphenolen die Verbindungen, die auch in Pflanzen vor oxidativen Stress schützen (HERMSDORFF et al., 2012; JOSHIPURA et al., 1999; KRINSKY, 2001; NOROOZI et al., 1998). In der vorliegenden Arbeit werden mit Ascorbinsäure, Polyphenolen und Carotinoiden Substanzen mit antioxidativen Eigenschaften betrachtet, die in hohen Gehalten in grünem Blattgemüse erwartet werden können.

2.4.2.1 Ascorbinsäure

Unter den hydrophilen Radikalfängern wird die Ascorbinsäure als wichtigstes Antioxidans für den Menschen angesehen (DU et al., 2012; FREI et al., 1989), welches in seiner Radikalform zudem ungefährlich ist (SMIRNOFF et al., 2000). Ascorbinsäure dient als Elektronendonator für verschiedene Radikale, wie Hydroxyl-, Alkoxyl-, Peroxyl- und Thiolradikale (DU et al., 2012; FREI et al., 1989) und wird dadurch direkt mit der Vermeidung von DNA-Schäden assoziiert, die durch oxidativen Stress ausgelöst werden (FRAGA et al., 1991). Durch die Elektronenübertragung entsteht Dehydroascorbinsäure, die in einem Recyclingprozess unter Beteiligung von Glutathion reduziert wird (MAY et al., 1995; MEISTER, 1992). Weiterhin führt eine Elektronenübertragung von der Ascorbinsäure auf Fe^{3+} zur Bildung von Fe^{2+} , welches im aktiven Zentrum von Dioxygenasen der Aufrechterhaltung der Kollagensynthese und der Regulation von Transkriptionsfaktoren dient (DU et al., 2012). Ein Ascorbinsäuremangel führt entsprechend zu einer fehlerhaften Kollagensynthese und den Vitamin C-Mangelerscheinungen, die unter der Bezeichnung Skorbut zusammengefasst werden (MEISTER, 1992). Weitere Enzyme, die Ascorbinsäure als Cofaktor benötigen, sind beteiligt an der Carnitinbiosynthese (REBOUCHE, 1991), Noradrenalinbiosynthese (MENNITI et al., 1986), der Serotoninbiosynthese (NAKASHIMA et al., 1970), an der α -Amidierung bei der Synthese verschiedener Peptidhormone (EIPPER et al., 1983; GLEMBOTSKI, 1984), dem Vitamin D-Metabolismus (SERGEEV et al., 1990) und dem transmembranen Elektronentransfer in den Erythrozyten (MAY et al., 1995). Im Eisenstoffwechsel fördert Ascorbinsäure sowohl die Absorption (ZIMMERMANN und HURRELL, 2007), als auch den Einbau in Chelate (BRIDGES und HOFFMAN, 1986). Zudem

wird eine immunologische Funktion von Ascorbinsäure diskutiert, insbesondere bezüglich der Prävention und Behandlung von Erkältungskrankheiten. Auswertungen von über 60 Studien zeigen präventive Effekte einer Vitamin C-Supplementierung vorwiegend bei Personen, die eine geringe Vitamin C-Aufnahme durch die Ernährung aufwiesen, während positive therapeutische Effekte bei einer breiteren Gruppe vorlagen (HEMILÄ, 1999, 1996; HEMILÄ und DOUGLAS, 1999). Zurückgeführt werden die positiven Effekte unter anderem auf eine Erhöhung der Proliferation von T-Lymphozyten (MANZELLA und ROBERTS, 1979; PUTHPONGSIRIPORN et al., 2001) und positive Wirkungen auf Neutrophile und Phagozyten (MANZELLA und ROBERTS, 1979; OLSON und POLK, 1977; ROTH und KAEBERLE, 1985).

Die Aufnahmeempfehlungen der WHO/FAO für Ascorbinsäure liegen bei 45 mg/ Tag (Männer und Frauen, 19-65 Jahre) (FAO/WHO, 2001) und beziehen sich auf das Ausgleichen metabolischer Verluste. Angenommen wird ein durchschnittlicher Vitamin C-Gehalt im Körper von 900 mg, bei dem ein Vitamin C-Mangel in Form von Skorbutsymptomen ausgeschlossen sein sollte, sowie die Absorptionseffizienz hoch und renale Verluste gering sind (HODGES, 1987). Eine renale Ausscheidung wird bei den betrachteten Aufnahmemengen auf Grundlage der Untersuchungen von GRAUMLICH et al. (1997) und MELETHIL et al. (1986) ausgeschlossen. Angenommene katabolische Verluste von 2,9% (BAKER et al., 1971) und eine Absorptionseffizienz von 85% (MELETHIL et al., 1986) führen zu einem geschätzten durchschnittlichen Bedarf von 30 mg/ Tag. Korrigiert um 2 Standardabweichungen liegt der RNI bei 45 mg/ Tag (FAO/WHO, 2004a).

Die EFSA und D-A-CH orientieren sich bei ihren Aufnahmeempfehlungen an einer optimalen Erfüllung aller Funktionen des Vitamin C (BECHTHOLD, 2015; EFSA, 2010). Die Aufnahmeempfehlungen beider Organisationen liegen mit 110 mg/ Tag (Männer, > 25 Jahre) bzw. 95 mg/ Tag (Frauen, > 25 Jahre) (DGE, 2019; EFSA, 2017a) deutlich höher als die der WHO/FAO. Auch diese Berechnungen beziehen sich auf den Ausgleich metabolischer Verluste, wobei jedoch andere Werte angenommen werden. Der Vitamin C-Gehalt im Körper wird über das Ascorbat-Plasmalevel definiert, welches bei einer Konzentration von $50 \mu\text{mol l}^{-1}$ als adäquat angenommen wird (BECHTHOLD, 2015). Der angenommene Vitamin C-Gehalt im Körper liegt dadurch bei etwa 1,5 g und somit deutlich höher als die Annahme der WHO/FAO. Obgleich die gleiche katabolische Rate wie bei der WHO/FAO in die Berechnung eingeht, liegen die täglichen Vitamin C-Verluste bei etwa 50 mg. Aufgrund der höher empfohlenen Aufnahmemenge sinkt die Bioverfügbarkeit auf etwa 80% (GRAUMLICH et al., 1997; KALLNER et al., 1979; LEVINE et al., 1996), die renale Ausscheidung steigt hingegen auf etwa 25% (LEVINE et al., 1996). Unter Berücksichtigung eines Variationskoeffizienten von 10% wurde von der D-A-CH-Organisation eine tägliche Aufnahmeempfehlung von 110 mg/ d festgelegt. Die Aufnahmeempfehlung für Frauen und Kinder weicht aufgrund geringerer Körpergewichte ab. Neben individuellen Bedarfsunterschieden ergibt sich für schwangere und stillende Frauen sowie Raucher ein erhöhter Vitamin C-Bedarf. Bei Letzteren muss neben höheren metabolischen Verlusten ein geringeres Plasmalevel berücksichtigt werden (BECHTHOLD, 2015).

Aufgrund unterschiedlicher Kriterien gehen auch in der Wissenschaft die Meinungen über optimale Aufnahmemengen weit auseinander. Die Vermeidung klinischer Skorbutmangelerkrankungen soll bereits bei einer Aufnahmemenge von 6,5-10 mg pro Tag möglich sein (HODGES et al., 1969; HOOD und STEVEN, 1969; KREBS, 1953). Auf diesen Wert beruft sich HODGES (1987), der Aufnahmemengen von 40 mg (Männer) bzw. 30 mg (Frauen) als ausreichend bezeichnet, da Skorbut verhindert wird, die Absorptionseffizienz hoch ist, renale Verluste gering und 1-monatige Perioden geringer Aufnahmemengen tolerierbar sind. Zudem wird darauf hingewiesen, dass keine gesundheitlichen Vorteile höherer Aufnahmemengen belegt sind. Auf physiologische Kriterien beziehen sich auch andere Wissenschaftler. GRAUMLICH et al. (1997), LEVINE et al. (1996) und ZEMEL und SHI (2000) empfehlen aufgrund der sigmoidalen Abhängigkeit der Vitamin C-Plasmakonzentration von der aufgenommenen Menge eine Anhebung der Aufnahmeempfehlung auf 200 mg/ Tag. Auf Grundlage von pharmakokinetischen Eigenschaften, des Vitamin C-Gehalts im Körper, Metabolismus und Exkretion empfehlen KALLNER et al. (1979) und LEVINE et al. (2002) eine Aufnahmemenge von 90 bzw. 100 mg/ Tag, die in etwa der Größenordnung der EFSA/D-A-CH-Empfehlung entspricht. Daneben werden von anderen Wissenschaftlern auch die funktionellen Eigenschaften des Vitamin C bei der Beurteilung herangezogen. CARR und FREI (1999) empfehlen Aufnahmemengen von 90-100 mg/ Tag als Vitamin C-Menge, die notwendig ist für eine optimale Reduktion chronischer Krankheiten bei Nichtrauchern. Positive Effekte auf die kutane antioxidative Aktivität wurden bei höheren Ascorbinsäure-konzentrationen (180 mg/ Tag) beobachtet (LAUER et al., 2013). Auch zeigten höhere Vitamin C-Aufnahmen aus Obst und Gemüse positive Effekte auf diverse Krebserkrankungen bei Frauen (SHIBATA et al., 1992). Obgleich bestimmte gesundheitsfördernde Effekte angezweifelt werden (LYKKESFELDT und POULSEN, 2010), sehen manche Wissenschaftler Aufnahmemengen von bis zu 1000 mg/ Tag als sinnvoll an (DERUELLE und BARON, 2008).

2.4.2.2 Carotinoide

Von den bekannten 700 Carotinoiden, die im Pflanzenreich vorkommen, sind nur Lycopin, α - und β -Carotin, Lutein, Zeaxanthin und β -Cryptoxanthin relevant für die Humanernährung (FERNÁNDEZ-GARCÍA et al., 2012; KHACHIK et al., 1995). Von diesen weisen α - und β -Carotin sowie β -Cryptoxanthin eine Provitamin A-Wirkung auf und können im Körper zu Retinol, Retinal oder Retinsäure umgebaut werden (HANDELMAN, 2001; PALACE et al., 1999). Diese Verbindungen können bei einer omnivoren Ernährungsweise in entwickelten Ländern etwa 35% der Vitamin A-Zufuhr ausmachen (WEBER und GRUNE, 2012). Die höchste Aktivität hat β -Carotin, da das Molekül im Körper, katalysiert durch die β , β -Carotin 15,15'-Monooxygenase, oxidativ in zwei Retinale gespalten werden kann (GOODMAN et al., 1966; YAN et al., 2001).

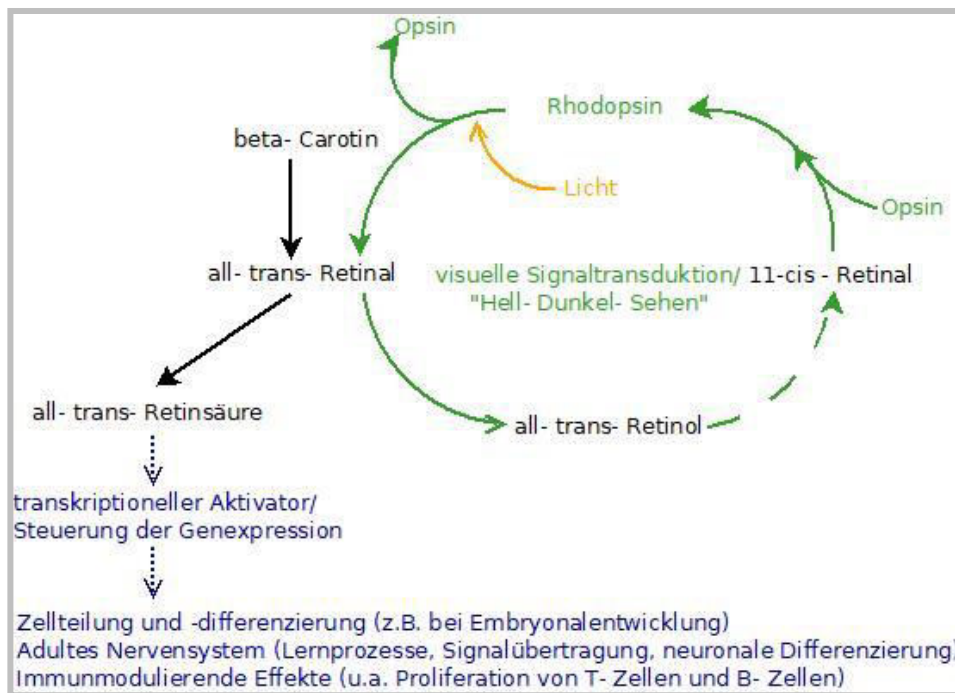


Abbildung 2.29: Funktionen Vitamin A-wirksamer Substanzen beim Menschen: β -Carotin wird im Körper oxidativ gespalten zu all-trans-Retinal; Grün dargestellt: über all-trans-Retinol wird all-trans-Retinal umgewandelt in 11-cis-Retinal, welches mit Opsin Rhopsin bildet. Durch Lichteinfall wird die Verbindung getrennt und wieder all-trans-Retinal gebildet. Der Zyklus ist verantwortlich für die farbneutrale Lichtwahrnehmung; Als weiterer wichtiger Metabolit wird all-trans-Retinal irreversibel zu all-trans-Retinsäure oxidiert. Durch Bindung an Retinoidrezeptoren wird die Expression zahlreicher Gene reguliert (blau dargestellt) (AL TANOURY et al., 2013; MEY, 2017; MORA et al., 2008)

Sowohl Carotinoide, als auch die Vitamin A-Spaltprodukte, verfügen über antioxidative Eigenschaften, die auf ihrer hydrophoben Kette aus Polyene-Einheiten beruhen (PALACE et al., 1999; TESORIERE et al., 1993) und beeinflusst werden durch funktionelle Gruppen, wie Carbonyl- und Hydroxylgruppen, und die Anzahl konjugierter Doppelbindungen im Molekül (GALANO, 2007; MILLER et al., 1996; WOODALL et al., 1997). Dadurch sind die Moleküle fähig, Singulett-Sauerstoff zu quenchen, Thiyl- und Sulfonylradikale zu neutralisieren und Peroxylradikale zu stabilisieren (EVERETT et al., 1996; PALACE et al., 1999; TESORIERE et al., 1993). Durch die Akkumulation der Carotinoide in der Haut (TERAO et al., 2011) und ihre Eigenschaft, Singulett-Sauerstoff zu quenchen, schützen Carotinoide vor Rauheit und lichtinduzierter Hautalterung (RIZWAN et al., 2011; TERAQ et al., 2011), da die schädigende Wirkung freier Radikale auf Elastin und Kollagenfasern (LADEMAN et al., 2011) und die Akkumulation von peroxidierten Hautlipiden, einschließlich Cholesterolhydroperoxiden, verringert werden (TERAQ et al., 2011). Zudem können Carotinoide die Lipidperoxidation (EVERETT et al., 1996), die Oxidation von Low-Density-Lipoproteinen (OJIMA et al., 1993; PACKER, 1993) und die Bildung von Phospholipidhydroperoxiden in Erythrozyten und Plasma unterbinden, welche mit der Entstehung von Demenz in Zusammenhang gebracht werden (NAKAGAWA et al., 2011). Des Weiteren werden die antioxidativen Eigenschaften der Carotinoide mit verbesserten kognitiven Funktionen assoziiert (KELLY et al., 2015; VISHWANATHAN et al., 2014). Die antioxidativen Eigenschaften (BEATTY et al., 2001; MARES, 2016) und Absorptionseigenschaften (SNODDERLY, 1995) der Maculapigmente Lutein und Zeaxanthin werden mit einem Schutz vor

photooxidativen Schädigungen der Macula und Altersbedingter Maculadegeneration in Zusammenhang gebracht (ARONOW und CHEW, 2014; BEATTY et al., 2001; LI et al., 2010).

Auch eine Stärkung der Immunabwehr, einschließlich der Reduktion diverser Krebsarten, wird mit den antioxidativen Eigenschaften der Carotinoide assoziiert (ÇOBANOĞLU et al., 2002; DI MASCIO et al., 1989; HUGHES, 2001; KIM und KIM, 2015). Daneben wurde eine Steigerung der Monozytenfunktion, der natürlichen Killerzellen-Aktivität, sowie der Anzahl an Lymphozyten, B- und T-Zellen (ALEXANDER et al., 1985; HUGHES, 1999; MURATA et al., 1994; PARK et al., 2010; ROSS, 2012; SANTOS et al., 1996; WATSON et al., 1991) und eine Reduktion der Tumornekrosefaktorsekretion (ÇOBANOĞLU et al., 2002; MARCOTORCHINO et al., 2012) durch verschiedene Carotinoide beobachtet. Die Aufnahme bestimmter Carotinoide aus Obst und Gemüse wird in Verbindung gebracht mit einem geringeren Lungen- (HOLICK et al., 2002), Prostata- (NORRISH et al., 2000; WU et al., 2004), Magen- (KIM und KIM, 2015) und Darmkrebsrisiko (SLATTERY et al., 2000), unter anderem zurückgeführt auf eine Reduktion der Zellviabilität der Krebszellen durch Induktion der Apoptose (KOTAKE-NARA et al., 2018).

In den letzten Jahren sind Funktionen der Carotinoide mit Provitamin A-Wirkung und Vitamin A bei der Kontrolle von Fettzellenfunktion, Adipositas und Fettleibigkeit in den Fokus gerückt. Bei Studien mit Nagetieren konnte ein hemmender Effekt von Carotinoiden und Retinolen auf die Adipogenese beobachtet werden, einhergehend mit einer erhöhten Glucosetoleranz und Insulinsensitivität (AMENGUAL et al., 2011, 2010; BERRY und NOY, 2009; BONET et al., 2000; FELIPE et al., 2005, 2004; MANOLESCU et al., 2009; MERCADER et al., 2008). Eine Wirkung beim Menschen wurde bislang nur vereinzelt beschrieben (CANAS et al., 2012; LUISA BONET et al., 2015).

Aufnahmeempfehlungen von WHO/FAO, EFSA und D-A-CH ergeben sich durch die Provitamin A-Wirkung bestimmter Carotinoide und beziehen sich auf die Aufrechterhaltung einer adäquaten Vitamin A-Reserve in der Leber als wichtigstes funktionelles Kriterium für eine ausreichende Versorgung (DOETS et al., 2008; EUROPEAN FOOD SAFETY AUTHORITY, 2015; FAO, 1988). Eine individuelle Aufnahmeempfehlung für einzelne Carotinoide liegt nicht vor (BEATTY et al., 2001). Die WHO/FAO empfiehlt eine Aufnahme von 0,6 mg/d (Männer, 19-65 Jahre) und 0,5 mg/d (Frauen, 19-65 Jahre) (FAO/WHO, 2001). Bei der EFSA liegen die Werte mit 0,75 mg/d (Männer, >25 Jahre) und 0,65 mg/d (Frauen, >25 Jahre) etwas höher (EFSA, 2017a). Die höchsten Aufnahmeempfehlungen liefert die D-A-CH-Organisation mit 1 mg/d (Männer, 19-51 Jahre) und 0,8 mg/d (Frauen, 19-51 Jahre) (DGE, 2019). Die Berechnungen der WHO/FAO und EFSA sind dabei identisch, wobei es Unterschiede bezüglich der angenommenen Werte gibt (Tabelle 2.1). Die Berechnungsgrundlagen der D-A-CH-Organisation sind nicht bekannt. Der EAR-Wert (Estimated Average Requirement) für Männer liegt mit 600 µg RE/Tag im Bereich des Wertes der EFSA, der hohe RDA ergibt sich durch einen Variationskoeffizienten von 30% (EUROPEAN FOOD SAFETY AUTHORITY, 2015).

Tabelle 2.1: Annahmen für die Berechnung der empfohlenen Vitamin A-Aufnahmemengen der WHO/FAO und EFSA

	WHO/ FAO	EFSA
Retinolspeicher in der Leber	20 µg/ g	20 µg/ g
Verhältnis Leber/ Körpergewicht	0,03	0,024
Körpergewicht Mann	65 kg	68,1 kg
Anteil Retinolspeicher in der Leber an Gesamtspeicher	90%	80%
Katabolische Rate	0,5%	0,7%
Speichereffizienz (Leber)	50%	50%
Verlust endogener Reserven pro Tag	434 µg	570 µg
Variationskoeffizient	20%	15%
RDA [µg/ d]	600	750

Quellen: (EUROPEAN FOOD SAFETY AUTHORITY, 2015; FAO, 1988)

Die RDAs der drei Organisationen gewährleisten eine Vermeidung des Vitamin A-Mangelsymptoms Xerophthalmie, wofür eine Aufnahme von 300 µg erforderlich ist (SAUBERLICH et al., 1975) und überschreiten auch die von OLSON (1987) angegebene tägliche Aufnahmemenge von 506 µg für Männer und 413 µg für Frauen für die Aufrechterhaltung eines adäquaten Körperpools.

Eine Umrechnung der RDAs in Carotinoid-Aufnahmemengen ist schwierig. Als Konversionsfaktoren werden durch die D-A-CH-Organisation 6 für β -Carotin und 12 für andere Provitamin A-Carotinoide (DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR ERNÄHRUNG E.V., 2019), basierend auf einer Veröffentlichung der WHO aus dem Jahre 1967 (FERNÁNDEZ-GARCÍA et al., 2012), angenommen. Variierende Bioverfügbarkeiten, unterschiedliche Verarbeitung, Matrix und Zusammensetzung der Lebensmittel, unterschiedliche Polaritäten der Moleküle und Interaktionen zwischen Carotinoiden (MASHURABAD et al., 2017; VAN HET HOF et al., 2000) führen unter Wissenschaftlern zu Zweifeln bezüglich der Anwendbarkeit dieser Faktoren (FERNÁNDEZ-GARCÍA et al., 2012; SCOTT und RODRIQUEZ-AMAYA, 2000; TANG, 2010). Diskutiert werden Konversionsfaktoren von 12 (für β -Carotin) bzw. 24 (für andere Provitamin A-wirksame Carotinoide) (INSTITUTE OF MEDICINE, 2001).

Die durchschnittliche Carotinoidaufnahme beträgt in fünf europäischen Ländern 9,5-16,1 mg/Tag (NEILL et al., 2001), die β -Carotinaufnahme liegt in den westlichen Ländern im Durchschnitt bei 3,9 mg/ Tag, wodurch das Provitamin, bezogen auf einen Konversionsfaktor von 12, etwa 35% der empfohlenen Vitamin A-Zufuhr ausmacht (WEBER und GRUNE, 2012). Unter Berücksichtigung der Bedeutung von β -Carotin für die Vitamin A-Zufuhr wird von der nationalen Verzehrsstudie II eine Empfehlung von 2-4 mg/ Tag ausgegeben, vom IoM 3-6 mg/ Tag (INSTITUTE OF MEDICINE, 2000a). Bei einer veganen Ernährung wären 6-12 mg β -Carotin bzw. 12-24 mg β -Cryptoxanthin/ α -Carotin erforderlich. Einige Wissenschaftler empfehlen höhere Aufnahmemengen (BLOCK et al., 2001; BREVIK et al., 2004; BROEKMANS et al., 2000; CAMPBELL et al., 1994; FULLER et al., 1992; MICOZZI et al., 1992; RECORD et al., 2001; VAN HET HOF et al., 1999; YONG et al., 1994; ZINO et al., 1997). Nicht berücksichtigt werden Carotinoide ohne Provitamin-Wirkung. Wenn analog zu den Polyphenolen (siehe Abschnitt 2.4.2.3) als Grundlage für Aufnahmeempfehlungen einzelner Carotinoide die „5 a day“-Regel (750 g/Tag) genommen würde, würde dies bei einem Obst-und Gemüseverzehr, welcher typisch für Norwegen

ist, eine Aufnahme von 1,7 mg α -Carotin, 5,7 mg β -Carotin, 0,7 mg Lutein, 0,9 mg Lycopin und 4,3 mg β -Cryptoxanthin bedeuten (BREVIK et al., 2004). Je nach Konversionsfaktor und Ernährungsform könnte dies auch ausreichen, um den Vitamin A-Bedarf zu decken.

2.4.2.3 Polyphenole

Polyphenole gelten als nicht-essentiell für die Humanernährung. Dennoch stehen Polyphenole, bzw. polyphenolreiche Produkte, aufgrund verschiedener Wirkungen im Fokus, die zu Bezeichnungen wie „Superfoods“, „Nutraceuticals“ und „lifespan essentials“ führen (BAHADORAN et al., 2013; HANCOCK et al., 2007; SAJILATA et al., 2008). Die meisten positiven Effekte der Polyphenole beziehen sich auf deren antioxidative Eigenschaften und enzymhemmende Wirkungen.

Durch konjugierte Ringstrukturen und freie Hydroxygruppen im Molekül (DI MAJO et al., 2005; JANG et al., 2005; RICE-EVANS et al., 1995; SENBA et al., 1999; SIES, 2010; SINGLETON et al., 1999) haben die meisten phenolischen Substanzen das Potential, freie Radikale wie Superoxid-Anionen (CHUN et al., 2003; COSTANTINO et al., 1992; ROBAK und GRYGLEWSKI, 1988; SABU et al., 2002; VALENTÃO et al., 2002), Hydroxylradikale (LIN et al., 2003; OZGOVÁ et al., 2003; SABU et al., 2002; VALENTÃO et al., 2002), Peroxylradikale (SALAH et al., 1995; SAWA et al., 1999; SERAFINI et al., 1998), Singulett-sauerstoff (JANG et al., 2005) und Stickstoffmonoxid (LIN et al., 2003) zu quenchen. Pro-oxidative Enzyme werden gehemmt (BAUMANN et al., 1980; COSTANTINO et al., 1992; DU et al., 2007; HO et al., 1992; LOKE et al., 2008; PSOTOVÁ et al., 2004; SÁNCHEZ et al., 2006), antioxidativ wirksame Enzyme unterstützt (ANILA und VIJAYALAKSHMI, 2003; NAGATA et al., 1999). Polyphenole werden mit einer Erhöhung der antioxidativen Kapazität im Plasma und einer Reduktion der Lipidperoxidation (DEVARAJ et al., 2002; MANACH et al., 1998; MERTENS-TALCOTT et al., 2006; OZGOVÁ et al., 2003; SABU et al., 2002; SERAFINI et al., 1998; TORABIAN et al., 2009) assoziiert, zurückgeführt auch auf membranstabilisierende Effekte der Polyphenole, wodurch die Mobilität freier Radikale in der Doppellipidschicht eingeschränkt wird (ARORA et al., 2000; CHEN et al., 2002; ERLEJMAN et al., 2004; MARGINA et al., 2012; OTEIZA et al., 2005; SUWALSKY et al., 2007; TSUCHIYA, 1999). Hemmende Effekte von Phenolsäuren (HSIEH et al., 2005) und Flavonoiden (KATYAR et al., 2001) gegenüber UV B-induzierten Oxidationen reduzieren ebenfalls die Entstehung von ROS. Jedoch werden Polyphenolen unter bestimmten Umständen jedoch auch pro-oxidative Wirkungen zugesprochen (AZMI et al., 2006), unter anderem durch die Reduktion von Eisen, welches dadurch im Rahmen der Fenton-Reaktion an der Reduktion von Wasserstoffperoxid zu Hydroxylradikalen teilnehmen kann (MIRA et al., 2002).

Die antioxidativen Eigenschaften (DAMIANAKI et al., 2000; LIN et al., 1999) und antiproliferativen Aktivitäten der Polyphenole (LOA et al., 2009) werden mit einer Reduktion von Brustkrebs (DAMIANAKI et al., 2000), Leberkrebs (LOA et al., 2009), Lungenkrebs (KNEKT et al., 2002; LEANDERSON et al., 1997; OKABE et al., 1997; YANG et al., 1998), Dickdarmkrebs (ARAÚJO et al., 2011; YANG et al., 1998) und

Pankreaskrebs (KNEKT et al., 2002; MOURIA et al., 2002) assoziiert. Auch viele Herz-Kreislaufkrankungen, u. a. Atherosklerose, werden durch oxidativen Stress und chronische Entzündungsprozesse induziert (CHIVA-BLANCH et al., 2013) und in Studien mit Tieren (AUGER et al., 2005; FUHRMAN et al., 2005; HAYEK et al., 1997; LOKE et al., 2010; WADDINGTON et al., 2004) und Menschen (AVIRAM et al., 2002; CHIVA-BLANCH et al., 2012; KLEEMANN et al., 2011) durch Polyphenole reduziert. Ferner können die antioxidativen Eigenschaften der Polyphenole positive Wirkungen im Hinblick auf neurologische und psychische Erkrankungen (BISSON et al., 2008; KESSE-GUYOT et al., 2012; KURIYAMA et al., 2006; LAU et al., 2005; LEVITES et al., 2001; PAPANDREOU et al., 2009; PASE et al., 2013; PENG et al., 2005; VALLS-PEDRET et al., 2012; WANG et al., 2008; WILLIS et al., 2009) sowie die Haut- (BONINA et al., 1996; VAYALIL et al., 2004) und Augengesundheit haben (ENGELMANN und FUNK, 2009; GUPTA et al., 2002; HEO et al., 2008; JANG et al., 2005; THIAGARAJAN et al., 2001; WANG et al., 2017; YANG et al., 2007b).

Weiterhin werden Polyphenolen durch Verbesserungen der Blutfettwerte (AUGER et al., 2005; DUCHNOWICZ et al., 2012; FUHRMAN et al., 2005; HAYEK et al., 1997; HOOPER et al., 2008; MEDINA-REMÓN et al., 2017; VINSON et al., 2001; YOKOZAWA et al., 2002), Verringerung des Blutdrucks (HOOPER et al., 2008; MEDINA-REMÓN et al., 2017; PENG et al., 2005; YOKOZAWA et al., 2002), einer Erhöhung der Membranstabilität (MARGINA et al., 2012), einer Verbesserung der endothelialen Funktion (ANTER et al., 2004; HEISS et al., 2007; LEKAKIS et al., 2005; SCHROETER et al., 2006) und der damit verbundenen flussvermittelten Dilatation (BALZER et al., 2008; HOOPER et al., 2008; SCHROETER et al., 2006) mit positiven Wirkungen bezüglich der Entstehung von Herz-Kreislaufkrankungen assoziiert (KNEKT et al., 2002, 1996; KURIYAMA et al., 2006; MEDINA-REMÓN et al., 2017; SCHWARTZ et al., 1991; STEINBERG et al., 1989; TRESSERRA-RIMBAU et al., 2014). Diesbezüglich soll auch die Regulation bestimmter Enzyme relevant sein (ANTER et al., 2004; BALZER et al., 2008; DIAZ-GONZLEZ et al., 2012; DYCK et al., 1999; HARDIE, 2008; KIM et al., 2000; SÁNCHEZ et al., 2006; STRIEGEL et al., 2015; TADERA et al., 2006; WILLIAMSON, 2013; ZANG et al., 2006). Viele weitere positive Effekte werden beschrieben, unter anderem bezüglich der Prävention von Typ 2-Diabetes (CAO et al., 2018; CIOCOIU et al., 2009; DE AZEVEDO et al., 2014; HOSODA et al., 2003; KIANBAKHT et al., 2013; KNEKT et al., 2002; OGAWA et al., 2013; SABU et al., 2002; TRESSERRA-RIMBAU et al., 2015; XIAO et al., 2011) und Karies (FERRAZZANO et al., 2009; SAKANAKA et al., 1992, 1990, 1989; YAMANAKA-OKADA et al., 2008; YANAGIDA et al., 2000).

Dennoch werden Polyphenole nach dem derzeitigen Stand nicht als essentielle Nährstoffe für Wachstum und Entwicklung klassifiziert (WILLIAMSON und HOLST, 2008), begründet auf nicht ausreichende Informationen zu Auswirkungen von Unter- und Überversorgung und insbesondere klassischen Mangelsymptomen, sowie der hohen Varietät der Verbindungen. Eine offizielle Aufnahmeempfehlung für Polyphenole, und somit auch für Flavonoide und Anthocyane, liegt nicht vor. Auf Grundlage der „5 a day“-Regel, nach der täglich fünf Portionen Obst oder Gemüse verzehrt werden sollten, berechneten WILLIAMSON und HOLST (2008) ein Aufnahmemenge von >500 mg. Die tatsächliche aufgenommene

Menge an Polyphenolen aus Obst und Gemüse liegt in vielen Ernährungsstudien deutlich unterhalb 500 mg, der größte Anteil der verzehrten Polyphenole entfällt auf Kaffee und Tee. In einer Studie mit finnischen Erwachsenen lag die tägliche Polyphenolaufnahme bei 863 mg aus Kaffee und Tee, die aufgenommene Flavonoidmenge von 33 mg/ Tag ist hingegen ein Indikator für einen geringen Obst-und Gemüsekonsum (OVASKAINEN et al., 2008). Eine umfassende Studie mit 7200 Probanden aus Spanien berechnete die durchschnittliche tägliche Aufnahme von Polyphenolen mit 820 mg (TRESSERRA-RIMBAU et al., 2013). Auch hier haben Phenolsäuren, vorwiegend aus dem Kaffeekonsum stammend, einen hohen Anteil von 304 mg. Der Anteil an Flavonoiden mit 443 mg ist jedoch höher als bei der finnischen Studie. Als wichtige Polyphenolquelle werden in dieser Studie Oliven und Olivenöl genannt. Als weiteres mediterranes Land wurde die tägliche Polyphenolaufnahme in Frankreich untersucht. Durch Obst und Gemüse wurden ca. 280 mg/ d aufgenommen (BRAT et al., 2006), alle Lebensmittel berücksichtigend 1193 mg/ d. Davon entfielen 506 mg auf Flavonoide (PÉREZ-JIMÉNEZ et al., 2011). Abweichend von den beschriebenen Studien sind die Ergebnisse einer polnischen Verzehrsstudie mit einer täglichen durchschnittlichen Polyphenolaufnahme von 1765 mg, gleichmäßig verteilt auf Flavonoide und Phenolsäuren (GROSSO et al., 2014).

2.4.2.4 Mineralstoffe

Bei den Aufnahmeempfehlungen für Mineralstoffe muss die Bioverfügbarkeit berücksichtigt werden. Diese wird durch Ballaststoffe, Phytinsäure, Oxalsäure, Tannine und Phosphate (EGLI et al., 2002; WOLTERS et al., 1993) stark herabgesetzt, durch Ascorbin- und Zitronensäure hingegen verbessert (WOLTERS et al., 1993).

Nitrat ist kein essentieller Nährstoff für den Menschen. Die Gehalte werden in einigen Lebensmitteln jedoch aus gesundheitlichen Gründen streng kontrolliert. Grünes Blattgemüse hat tendenziell hohe Gehalte (BOSNIR et al., 2017). Nitrat wird, vorwiegend durch Bakterien auf der Zunge, zu Nitrit reduziert (PANNALA et al., 2003). Zudem wurde eine Säugetier-Nitratreduktase identifiziert (JANSSON et al., 2008). Durch den sauren pH-Wert im Magen wird Nitrit zu Stickoxiden und Nitrosaminen umgebaut (JANSSON et al., 2008; ROCHA et al., 2012). Den einzelnen Stoffwechselprodukten werden verschiedene Wirkungen auf die menschliche Gesundheit zugeschrieben. Nitrosamine werden mit kanzerogenen Eigenschaften assoziiert (HUANG et al., 1996) und unter anderem mit einem gesteigerten Magen- und Speiseröhrenkrebsrisiko in Zusammenhang gebracht (JAKSZYN und GONZÁLEZ, 2006; POBEL et al., 1995). Eine Studie zeigte jedoch, dass der Verzehr nitratreichen Gemüses das Krebsrisiko nicht erhöht, zurückgeführt auf die simultane Aufnahme antikanzerogen wirkender Substanzen (ROGERS et al., 1995). Nitrit kann zu einer Oxidation des zweiwertigen Eisens im Hämoglobin führen, wodurch Methämoglobin entsteht und die Sauerstofftransporteigenschaften negativ beeinflusst werden (KROSS et al., 1992; SHEARER et al., 1972). Besonders gefährdet sind Säuglinge, die nitratreiches Wasser (KROSS et al., 1992; SHEARER et al., 1972) oder Gemüse (SANCHEZ-ECHANIZ et al., 2001) verzehren, da die Aktivitäten der NADH-Methämoglobinreduktase, die Methämoglobin wieder zu Hämoglobin reduzieren kann, noch

nicht vollständig ausgeprägt sind (VETRELLA et al., 1971). Nicht eindeutig geklärt sind die Auswirkungen der Konkurrenz zwischen Nitrat und Iod um eine Aufnahme in die Schilddrüse. Vereinzelt wurde eine Hemmung der Iodakkumulierung in der Schilddrüse (ESKIOCAK et al., 2005; GATSEVA und ARGIROVA, 2008; VAN MAANEN et al., 1994) mit negativen Auswirkungen wie Dysfunktionen (GATSEVA und ARGIROVA, 2008) und Vergrößerungen der Schilddrüse (VAN MAANEN ET AL., 1994) assoziiert. Eine Metastudie zeigte diesbezüglich jedoch keine eindeutigen negativen Auswirkungen (BAHADORAN et al., 2015). Nachdem zunächst vorwiegend negative Effekte von Nitrat bzw. seiner Stoffwechselprodukte im Fokus standen, werden seit einigen Jahren auch vermehrt positive Wirkungen aufgezeigt. Den Metaboliten Stickstoffmonoxid und Stickoxid werden durch Nitrosierungen in der Darmschleimhaut schützende Effekte zugeschrieben (PEREIRA et al., 2015). Stickstoffmonoxid ist zudem ein Signalmolekül (SAND et al., 2002; WILEY und DAVENPORT, 2001), hat antimikrobielle Eigenschaften (DYKHUIZEN et al., 1999) und wird mit verschiedenen physiologischen Prozessen assoziiert, einschließlich kardiovaskulären und metabolischen Funktionen (OMAR et al., 2016; SOBKO et al., 2010). Durch seine gefäßerweiternden Eigenschaften wirkt Stickstoffmonoxid blutdrucksenkend und verbessert die endotheliale Funktion (HOBBS et al., 2013; KAPIL et al., 2015). Nitrat verbessert die mitochondriale Effizienz bei Menschen (LARSEN et al., 2011), wodurch der Sauerstoffverbrauch während physischen Aktivitäten gesenkt wird (BAILEY et al., 2009; LARSEN et al., 2010). Der reduzierte Sauerstoffverbrauch wird auf eine Verringerung des ATP-Verbrauchs zurückgeführt, wodurch hochintensive, physische Aktivitäten über einen längeren Zeitraum ausgeführt werden können (BAILEY et al., 2010) und die Ruhestoffwechselrate reduziert wird, resultierend in einem sinkenden Energieverbrauch im Ruhezustand (LARSEN et al., 2014).

Während für die organischen Inhaltsstoffe und die Mineralstoffe eine empfohlene Aufnahmemenge existiert, gibt es für Nitrat aufgrund der gesundheitlichen Bedenken eine Höchstaufnahmemenge. Diese liegt bei 3,7 mg/ kg Körpergewicht pro Tag, gemeinsam festgesetzt durch die EFSA und FAO/WHO. Eine Nitrataufnahme bis zu dieser Höchstmenge wird als nicht genotoxisch oder krebserregend eingeschätzt (EFSA, 2017b). Zugleich gibt es Höchstgehalte für Spinat, Kopfsalat und Beikost (EUROPÄISCHE KOMMISSION, 2005). Festgelegt in der EG-Verordnung Nr. 466/2001 gilt für frischen Spinat ein Höchstwert von 3000 bzw. 2500 mg Nitrat/ kg (1. Oktober – 31. März bzw. 1. April – 30. September). Bei Kopfsalat wird differenziert zwischen Salat, der unter Glas oder Folie gezogen wird und Freilandanbau sowie ebenfalls der Anbausaison. Die entsprechenden Höchstwerte liegen bei 2500-4500 mg/ kg. Somit wird den tendenziell höheren Nitratgehalten bei anbau- und saisonbedingt geringeren Lichtintensitäten entsprochen. Die Bioverfügbarkeit ist bei Nitrat irrelevant. Bei nitratreichem Gemüse konnte, sowohl im rohen als auch im gekochten Zustand, eine Bioverfügbarkeit von 100% bestimmt werden (VAN VELZEN et al., 2008).

Bei erwachsenen Menschen befindet sich 85% des **Phosphors** als Hydroxyapatit in den Knochen, die restlichen 15% in den weichen Geweben (DIEM, 1970, zit. nach CASHMAN und FLYNN, 1999). Phosphor ist Bestandteil der Phospholipide und zudem in Nukleotiden und Nukleinsäuren enthalten. Neben den

strukturellen Funktionen hat Phosphor diverse weitere Aufgaben. Als Bestandteil des Dihydrogenphosphat/ Hydrogenphosphatpuffers ist Phosphor an der Regulation des pH-Wertes im Blut (BETTELHEIM et al., 2010) und intrazellulären Raum (PIPER, 2013) beteiligt. Zudem ist Phosphor in den energiereichen Verbindungen ATP, ADP und NADP(H) (JOHNSON et al., 1989; LARA et al., 1993; SKAER et al., 1974) enthalten und dient als temporärer Speicher und dem Transfer von Energie (CASHMAN und FLYNN, 1999). Diverse katalytisch wirkende Proteine können durch eine Phosphorylierung aktiviert bzw. deaktiviert werden (BERTORELLO et al., 1991; COHEN, 1985; HURLEY et al., 1990; JOH et al., 1978).

Trotz vieler essentieller Funktionen wurde in mehreren Metastudien ein positiver Zusammenhang zwischen dem Serumphosphatspiegel und Leberversagen (DA et al., 2015) sowie der Sterberate bei Leber- (DA et al., 2015; PALMER et al., 2011) und Nierenerkrankungen (HOU et al., 2017) beobachtet. Zugleich kann eine hohe Phosphoraufnahme im Verhältnis zur Calciumaufnahme negative Effekte auf den Lipidmetabolismus haben (BU et al., 2012). In einer Studie wurde die Phosphoraufnahme mit einer blutdrucksenkenden Wirkung in Zusammenhang gebracht (ELLIOTT et al., 2008). Bezüglich der Knochengesundheit steht die Aufnahme von Phosphor in einem positiven Zusammenhang mit der Knochenmineraldichte (TRANQUILLI et al., 1994) und führt bei unzureichender Aufnahme bzw. einem hohen Ca:P-Verhältnis zu einer Beeinträchtigung der Knochenbildung (GAUNT und IRVING, 1940). Eine Auswertung verschiedener Studien zeigte zudem, dass eine vergleichsweise hohe Calciumaufnahme die Bioverfügbarkeit von Phosphor stark verringert. Hohe Phosphoraufnahmemengen werden für die Behandlung von Osteoporose gefordert (HEANEY, 2004), jedoch auch mit Störungen des Knochen- und Mineralstoffwechsels in Zusammenhang gebracht (GUTIÉRREZ et al., 2015).

Aufnahmeempfehlungen für Phosphor liegen von der WHO/FAO nicht vor. Die Werte der EFSA sind mit 550 mg/ d deutlich unterhalb der Empfehlung der D-A-CH-Organisation mit 700 mg/ d (DGE, 2019; EFSA, 2017a). Die Aufnahmeempfehlung für Phosphor wurde gemäß dem Calcium:Phosphor-Verhältnisses des Körpers gesunder Erwachsener (1,4:1) an der Aufnahmeempfehlung für Calcium ausgerichtet (EFSA, 2017a). Das IoM (Institute of Medicine) bezieht sich bei der Empfehlung auf die Menge, die erforderlich ist, um den Serumphosphatspiegel konstant zu halten. Der RDA liegt mit 700 mg/ d für Männer und Frauen zwischen 19-50 Jahren in dem Bereich der D-A-CH-Referenzwerte (INSTITUTE OF MEDICINE, 2000b). Die empfohlenen Phosphoraufnahmemengen werden in Japan (TAKEDA et al., 2002), Europa (FLYNN et al., 2009; WELCH et al., 2009) und den USA (CALVO und PARK, 1996; CALVO und URIBARRI, 2013) deutlich überschritten.

Kalium gehört, neben Natrium und Chlorid, zu den quantitativ bedeutsamsten, nicht komplexgebundenen Ionen. Als dominierendes Kation in der intrazellulären Flüssigkeit leistet Kalium einen zentralen Beitrag bei der Aufrechterhaltung des osmotischen Drucks (LANGENDORF, 1965). Ein Kaliumgradient zwischen intra- und extrazellulärem Raum ist von essentieller Bedeutung für die Regulation des Säure-Base-Haushalt (STERNS et al., 1981), des Membranpotenzials der Zelle und der zellulären Erregbarkeit (DOBERER, 2008), verbunden mit neuromuskulärer Reizbarkeit und Erregungsleitung (FLECKENSTEIN, 1951; LINDINGER, 1995) und steht vermutlich in einem Zusammenhang mit einer Verringerung der

renalen Calciumausscheidung und einem reduzierten Osteoporoserisiko (JEHLE et al., 2013; LAMBERT et al., 2015; TUCKER et al., 2001; ZHU et al., 2009). Intrazellulär vorkommendes Kalium ist zudem relevant für die Proteinbiosynthese und das Zellwachstum (LEDBETTER und LUBIN, 1977).

Viele Studien zeigen positive Wirkungen von Kalium auf die endotheliale Gefäßfunktion (HE et al., 2010) und den Blutdruck (BINIA et al., 2015; CAPPuccio und MACGREGOR, 1991; SUDHIER et al., 1993), begründet auf eine Erschlaffung des Epithels, Gefäßerweiterung und eine verstärkte Durchblutung (OBERLEITHNER et al., 2009). Die positiven Effekte bezüglich Blutdruck und Schlaganfallrisiko dienen als Grundlage für die Aufnahmeempfehlungen der EFSA und WHO/FAO (EFSA, 2017a; STAMLER et al., 2003; VAN MIERLO et al., 2010; WHO, 2012), die bei 3500 mg/d (EFSA, 2017a) bzw. 3510 mg/d (FAO/WHO, 2001) liegen. Mit 4000 mg/d (DGE, 2019) liegt die Aufnahmeempfehlung der D-A-CH-Organisation etwas höher als die der WHO/FAO und EFSA, wobei die Berechnungsgrundlage nicht bekannt ist. Neben einer Aufnahmeempfehlung für Kalium wird auch ein bestimmtes Verhältnis für die Natrium:Kalium-Aufnahme empfohlen, um eine Reduktion des Blutdrucks zu erreichen (STAMLER et al., 2003; VAN MIERLO et al., 2010). Die WHO empfiehlt diesbezüglich ein Verhältnis von 1:1 (WHO, 2012), begründet auf die antagonistische Wirkung des Kaliums gegenüber dem blutdrucksteigernden Effekt des Natriums (OBERLEITHNER et al., 2009; RODRIGUES et al., 2014; YANG, 2011) und assoziiert mit einem geringeren Risiko, einen Schlaganfall zu erleiden oder an kardiovaskulären Krankheiten zu erkranken (AARON und SANDERS, 2013; D'ELIA et al., 2011).

Mehr als die Hälfte des *Magnesiums* im menschlichen Körper befindet sich im Skelett und übernimmt dort vorwiegend strukturelle Funktionen (DUCKWORTH und WARNOCK, 1942; WIDDOWSON et al., 1951). Ein Magnesiummangel kann zu einer verstärkten Knochenresorption und einem resultierenden Verlust an Knochenmasse führen, was wiederum mit Osteoporose assoziiert wird (RUDE et al., 1999), beruhend auf seiner stabilisierenden Wirkung und der Beeinflussung des Parathylakoid- und Vitamin D-Spiegels (FATEMI et al., 1991). Die zweite Hälfte des Magnesiums befindet sich im Weichgewebe (DUCKWORTH und WARNOCK, 1942; WIDDOWSON et al., 1951) und ist zum größten Teil gebunden an Nukleinsäuren (BOWMAN et al., 2012; DRAPER und MISRA, 1998), energiereiche Phosphatverbindungen (FERENCZI et al., 1984; LAI et al., 1998; VIVAUDOU et al., 1991; WAYNE KIELLEY, 1955), Proteine (SPEICH et al., 1981) und Citrate (WALSER, 1961). Dort dient es u. a. der strukturellen Stabilisierung von Proteinen, Nukleinsäuren und Zellmembranen (BOWMAN et al., 2012; DRAPER und MISRA, 1998). Die geringen Mengen freier Magnesiumionen weisen eine hohe biologische Aktivität auf (SPEICH et al., 1981) und sind durch die Beeinflussung zahlreicher Enzymaktivitäten an diversen physiologischen Prozessen beteiligt (COWAN, 2002; ELIN, 1994). Als Bestandteil der Phosphoserinphosphatase (PEERAER et al., 2004) und Stabilisator der Glutamat-Dehydrogenase (WARREN et al., 1964) ist Magnesium in die Proteinbiosynthese involviert. Auch die Aktivität von Shingomyelinasen ist magnesiumabhängig, welche beteiligt sind an Zellwachstum und -differentierung, Apoptose und Entzündungsreaktionen (LIU und HANNUN, 1997). Als Antagonist von Calcium und durch Reduktion der Acetylcholinfreisetzung, beeinträchtigt Magnesium die neuromuskuläre Erregungsübertragung und wirkt vorbeugend gegenüber

Muskelverkrampfungen (DEL CASTILLO und ENGBAER, 1954; HUTTER und KOSTIAL, 1954; JENKINSON, 1957). Gebunden an ATP (MgATP) wird die Abspaltung energiereicher Phosphatreste erleichtert und die Energiegewinnung und –bereitstellung gefördert (FERENCZI et al., 1984; WAYNE KIELLEY, 1955), sowie die Aktivität von Transglutaminasen (LAI et al., 1998) und ATP-sensitiver K-Kanäle (VIVAUDOU et al., 1991) reguliert.

Magnesium werden zudem gefäßerweiternde Funktionen zugesprochen (ALTURA et al., 1984; TERAGAWA et al., 2001), assoziiert mit der Regulation von Natriumtransportern (KULICK et al., 1988) und einer blutdrucksenkenden Wirkung (DYCKNER und WESTER, 1983; JEE et al., 2002; MIZUSHIMA et al., 1998). Auch wird Magnesium in vielen Metastudien mit einer Reduktion von Herz-Kreislauf-Erkrankungen (DEL GOBBO et al., 2013; QU et al., 2013), einschließlich einem geringeren Schlaganfallrisiko (LARSSON et al., 2012) und positiven Effekten auf atriale und junctionale Arrhythmien (KULICK et al., 1988) in Zusammenhang gebracht. Eine gesteigerte Magnesiumaufnahme wird mit einem sinkenden Blutzuckerspiegel assoziiert (HERMES SALES et al., 2011), resultierend in einem reduzierten Diabetes mellitus-Risiko (LARSSON und WOLK, 2007; LOPEZ-RIDAURA et al., 2004; SCHULZE et al., 2007). Positive Effekte auf das Krebsrisiko (K. LI ET AL., 2011; WARK ET AL., 2012) und neurologische Prozesse (MCINTOSH et al., 1989; MCKEE et al., 2005; SEN und GULATI, 2010) sind umstritten.

Wie bei den meisten anderen Mineralstoffen werden die gesundheitsfördernden Effekte bei den Aufnahmeempfehlungen der WHO/FAO, EFSA und D-A-CH nicht berücksichtigt. Als Basis für die Aufnahmeempfehlungen dienen Balance-Studien, in denen Magnesiumaufnahme und –verluste miteinander abgeglichen und über einen definierten Zeitraum weder eine signifikante Netto-Aufnahme noch Netto-Verluste verzeichnet wurden (VORMANN und ANKE, 2002). Darauf aufbauend wurden von der EFSA Empfehlungen von 350 mg/ Tag (Männer) und 300 mg/ Tag (Frauen) festgelegt (EFSA, 2017a). Die Werte der D-A-CH-Organisation sind mit 350-400 mg/d (Männer) und 300 mg/ Tag (Frauen) vergleichbar (DGE, 2019). Die WHO/FAO berücksichtigten bei ihren Empfehlungswerten (260 mg/ d für Männer, 220 mg/d für Frauen) Angaben verschiedener Organisationen, unter anderem der EFSA, sowie die Ergebnisse von vier Balance-Studien (ANDON et al., 1996; MAHALKO et al., 1983; MARSHALL et al., 1976; MCCLANAHAN HUNT und SCHOFIELD, 1969).

Während die Referenzwerte in den 1990er Jahren in Deutschland nicht erreicht wurden (VORMANN und ANKE, 2002), zeigt eine neuere Studie aus dem Jahr 2009 für 10 europäische Länder Aufnahmemengen von 347-467 mg/ Tag bei Männern und 258-402 mg/ Tag bei Frauen (WELCH et al., 2009). Aufgrund der vergleichsweise hohen Magnesiumgehalte in grünem Gemüse und Nüssen (LARSSON und WOLK, 2007) wird bei einer vegetarischen Ernährungsweise mehr Magnesium aufgenommen (VORMANN und ANKE, 2002). Zudem unterscheiden sich die aufgenommenen Magnesiummengen zwischen ethnischen Gruppen (FORD und MOKDAD, 2003) und verschiedenen Erhebungsländern (HUNT und JOHNSON, 2018).

Calcium macht etwa 1-2% des adulten, menschlichen Körpers aus. Als Strukturkomponente des Skeletts liegt schätzungsweise 99% des Calciums im Körper als Calciumhydroxyapatit vor (CASHMAN, 2002) und ist mitverantwortlich für die Festigkeit und Stärke des Skeletts. Zudem kann Calcium aus Knochen mobilisiert werden und dient daher als Speicher (ALMEIDA PAZ und BRUNO, 2006; BELL et al., 1941). Eine hohe Mobilisierungsrate von Calcium im Rahmen der Knochenresorption, gefördert durch geringe Ca:P-Verhältnisse in der Nahrung (KEMI et al., 2010), führt jedoch zu Osteoporose (HARRISON und FRASER, 1960). Durch seine strukturellen Funktionen in den Knochen werden Calcium positive Effekte auf die Knochenmineraliendichte zugeschrieben (DAWSON-HUGHES und HARRIS, 2002; WELTEN et al., 1996), insbesondere bei einem höheren Bedarf während der Stillzeit (CHAN et al., 1987) und im Zusammenspiel mit sportlicher Aktivität (SPECKER, 1996). Ein Einfluss auf Hüftfrakturen wurde von SAHNI et al. (2010) festgestellt, während in anderen Studien kein Zusammenhang beobachtet wurde (BOLLAND et al., 2015; PRINCE et al., 2006).

Als essentielles, intrazelluläres Signalmolekül in Zellen und Gewebe (BERRIDGE et al., 1998; FOREHAND et al., 1989) ist Calcium unter anderem beteiligt an Muskelkontraktionen (DAVIES, 1963; SZENTGYÖRGYI, 1975) und –entspannung (NELSON et al., 1995), Leberstoffwechsel (FU et al., 2011; OHASHI-KANEKO et al., 2011; WILLIAMSON et al., 1981), Gentranskription (GREER und GREENBERG, 2008; PEUNOVA und ENIKOLOPOV, 1993; XIA et al., 1996), Zellproliferation (LIPKIN und NEWMARK, 1985; TUSCHIL et al., 1992), Wundheilung (WEIMANN und HERMANN, 1999) und Insulinausschüttung (DRAZNIN, 1988). Möglicherweise begründet auf der Hemmung der Zellproliferation (LIPKIN und NEWMARK, 1985) zeigten Meta-Analysen protektive Effekte von Calcium gegenüber Brust- (CHEN et al., 2010) und Dickdarmkrebs (HUNCHAREK et al., 2009), während eine Beeinflussung kardiovaskuläre Erkrankungen nicht geklärt ist (ALLENDER et al., 1996; BOLLAND ET AL., 2010; BUCHER et al., 1996; VAN MIERLO et al., 2006; WANG et al., 2014). Weiterhin führte eine calciumreiche Diät zu Reduktionen des Blutdrucks (ALLENDER et al., 1996; BUCHER et al., 1996; VAN MIERLO et al., 2006) und, bei Ratten und Kindern, des Körperfetts (CARRUTH und SKINNER, 2001; PPAKONSTANTINO et al., 2003).

Die empfohlenen Aufnahmemengen für Calcium bei erwachsenen Personen liegen bei allen drei Organisationen bei 950-1000 mg/ Tag (DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR ERNÄHRUNG E.V., 2019; EFSA, 2017a; FAO/WHO, 2001). Dies ist die Menge, die für die Aufrechterhaltung der Calciumbilanz und der skelettalen Integrität erforderlich ist (FAO/WHO, 2004b) unter Berücksichtigung von Verlusten über Urin, Fäkalien, Zähne, sowie Haut, Haare und Fingernägel (EFSA, 2017a; FAO/WHO, 2004b). Der Bedarf wird um die mengenabhängige Absorptionsrate korrigiert. Diesbezüglich spielt eine Verringerung der Bioverfügbarkeit durch Oxalsäure, Phytinsäure, Tannine und Ballaststoffe eine Rolle, die in grünem Blattgemüse um 48-75% reduziert sein kann (GUPTA et al., 2006), in oxalsäurereichen Gemüsen wie Rhabarber und Spinat sogar um 100% (WOLTERS et al., 1993). Zusätzlich wird die Absorptionsrate unter anderem durch das Alter der Personen (IRELAND und FORDTRAN, 1973), die Hautfarbe (ABRAMS et al., 1995), genetischen Faktoren (DAWSON-HUGHES et al., 1995), Proteinaufnahme (ANAND und

LINKSWILER, 1974; KERSTETTER et al., 1998) und den Kaffeeconsum (HASLING et al., 1992) beeinflusst. Die Aufnahmeempfehlungen sind jedoch umstritten, da potentiell positive Effekte nicht berücksichtigt werden (RODRÍGUEZ-RODRÍGUEZ et al., 2010).

Der gesamte menschliche Körper beinhaltet etwa 3-5 g **Eisen**. 65-70% des Eisens im Körper ist gebunden an Porphyrinringstrukturen als Hämoglobin, weitere 5% als Myoglobin und geringe Mengen sind enthalten in Cytochromen und diversen Enzymen (BLOEM, 1995). Das restliche Eisen wird in Transferrin, Ferritin (FINCH et al., 1986; HERBERT et al., 1997) oder Hemosiderin (GABRIO et al., 1953) gebunden, wodurch vor toxischen Wirkungen freier Eisenionen geschützt wird und die unlöslichen Ionen transportierbar werden (PONKA et al., 1998). Eisen ist in Hämoglobin und Myoglobin durch seine Fähigkeit, Sauerstoff zu binden, essentiell für dessen Transport von den Alveolen zu den peripheren Geweben (ADAMSON und FINCH, 1975; ANTONINI, 1965; BEARD, 2001) bzw. erhöht die Diffusionsrate von Sauerstoff aus den roten Blutkörperchen ins Cytoplasma und die Mitochondrien (BRAUNLIN et al., 1986; ORDWAY, 2004). Eisenhaltige Porphyrinkomplexe sind daneben verantwortlich für die funktionellen Eigenschaften verschiedener Proteine, z.B. der Cytochrome P450, der Cytochrome c-Oxidase sowie einiger Katalasen und Peroxidasen (GROVES et al., 1981; POWERS et al., 1981; PUTNAM et al., 2000; RICARD et al., 2001). Eine weitere Gruppe eisenhaltiger Proteine umfasst Enzyme mit Eisen-Schwefel-Zentren. Diese sind, wie auch einige Heme-Enzyme, beteiligt am mitochondrialen Elektronentransport (BEARD, 2001; DAVIES et al., 1982) und als Cofaktor der Aconitase relevant für die Umwandlung von Isocitrat zu Citrat (GARDNER et al., 1995).

Weiterhin ist Eisen ein Cofaktor der Tyrosin-Hydroxylase dem Schlüsselenzym der Dopamin-Synthese (KAUSHIK et al., 2007). In diversen Studien wurde gezeigt, dass das Restless-Legs-Syndrom (ALLEN, 2004; LEE et al., 2001), geringere kognitive Eigenschaften bzw. Entwicklungen bei Kindern (CARTER et al., 2010; RUFF et al., 1996; SESHADRI und GOPALDAS, 1989) und Erwachsenen (MURRAY-KOLB und BEARD, 2007) durch eine, mit einem Eisenmangel assoziierte, verringerte Dopaminsynthese entstehen können (YOUDIM und YEHUDA, 2000). Möglicherweise hat auch die Beteiligung von Eisen bei der Myelinisierung Einfluss (CONGDON et al., 2012; TODORICH et al., 2009). Auch ein, in mehreren Meta-studien dargestellter, Zusammenhang zwischen Eisenmangel und Depressionen (LI et al., 2017; NOORAZAR et al., 2015; SHARIATPANAAHI et al., 2007; SHEIKH et al., 2017) und chronischer Erschöpfung (Fatigue Syndrome) (GREIG et al., 2013; KRAYENBUEHL et al., 2011; WANG et al., 2013; YOKOI und KONOMI, 2017) wird mit einem beeinträchtigten Neurotransmittermetabolismus assoziiert (DUNLOP und NEMEROFF, 2007; VERDON et al., 2003). Jedoch fehlen diesbezüglich konkrete Untersuchungen.

Obgleich es in dem Zeitraum von 1990-2010 zu einer prozentualen Abnahme an Amämie-erkrankungen kam, deren Hauptursache ein Eisenmangel ist, gab es bei den absoluten Zahlen einen Anstieg. Eisenmangelanämien, beschrieben durch sinkende Hämoglobinkonzentrationen bei mangelhafter Eisenzufuhr (MILLER, 2013), betreffen weltweit etwa 10-20% der Menschen (KASSEBAUM et al., 2015). Oxalsäure, Phytinsäure, Tannine und Ballaststoffe verringern die Bioverfügbarkeit, wodurch in grünem Blattgemüse nur 6-40% des Eisens für den Menschen absorbierbar ist (GUPTA et al., 2006). Eine bessere

Bioverfügbarkeit des Häm-gebundenen Eisens (HALLBERG et al., 1997; HURRELL und EGLI, 2010) sowie eine Förderung der Absorption des nicht-Häm-gebundenen Eisens durch Fleischverzehr (BOTHWELL et al., 1989) führen zusätzlich zu starken Unterschieden der Eisenverfügbarkeit in Abhängigkeit von der Ernährungsform. Eine Verringerung des Fleisch- und Fischverzehrs reduziert die Eisenabsorption in westlichen Diäten um ca. die Hälfte (BOTHWELL et al., 1989; HUNT, 2003). In Regionen mit einem hohen Getreideverzehr, wenig/ keinem Fleisch oder Fisch sowie ascorbinsäurehaltigem Obst und Gemüse, liegt die Absorptionsrate mitunter bei $< 2\%$ (MADHAVAN NAIR und VASUPRADA IYENGAR, 2009; NARASINGA RAO et al., 1983). Die unterschiedlichen Absorptionsraten werden durch die WHO/FAO bei ihren Zufuhrempfehlungen berücksichtigt, mit 15% bei westlichen Diäten und 5-10% in Entwicklungsländern (FAO/WHO, 2004b). Basierend auf den durchschnittlichen Eisenverlusten als Bestandteil von Zellen über Haut oder innere Oberflächen wie dem Intestinaltrakt, Urinaltrakt und den Atmungswegen, wurde in Übereinstimmung mit BOTHWELL et al. (1989) und GREEN et al. (1968) ein Eisenbedarf für Männer und Frauen nach der Menopause $18 \mu\text{g}/\text{kg}$ Körpergewicht geschätzt. Bei Frauen vor der Menopause wird ein zusätzlicher Eisenbedarf von $0,6 \text{ mg}/\text{Tag}$ angenommen (FAO/WHO, 2004b). Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Körpergewichte ergeben sich Aufnahmeempfehlungen von $27,4\text{-}9,1 \text{ mg}/\text{d}$ (Männer, 19-65 Jahre), $58,8\text{-}19,6 \text{ mg}/\text{d}$ (Frauen, 19-65 Jahre) und $22,6\text{-}7,5 \text{ mg}/\text{d}$ (Frauen, nach der Menopause) (FAO/WHO, 2001).

Auch die EFSA berechnet ihre Zufuhrempfehlungen für Eisen auf Grundlage der Eisenverluste. Unter Annahme einer pauschalen Absorptionsrate für eine gemischte, westliche Diät von 16% für Männer und postmenopausale Frauen und durchschnittlichen Eisenverlusten von $1,72 \text{ mg}/\text{Tag}$ (BOTHWELL et al., 1989; GREEN et al., 1968) ergibt sich eine gerundete Zufuhrempfehlung von $11 \text{ mg}/\text{Tag}$. Höhere Eisenverluste und leicht höhere Absorptionsraten begründen eine empfohlene Eisenzufuhr von $16 \text{ mg}/\text{Tag}$ für premenopausale Frauen (EFSA, 2017a). Die Aufnahmeempfehlungen der D-A-CH- liegen mit $10 \text{ mg}/\text{d}$ (m, 19-51 Jahre) und $15 \text{ mg}/\text{d}$ (w, 19-51 Jahre) im Bereich der EFSA (DGE, 2019).

Nicht berücksichtigt ist, dass es bei Obesität, vermutlich vermittelt durch Leptin (DEL GIUDICE et al., 2009), zu einer verstärkten Bildung von Hepcidin kommt (BEKRI et al., 2006; DEL GIUDICE et al., 2009; SANAD et al., 2011), welches die enterale Eisenaufnahme und den Eisentransporter Ferroferrin hemmt (BEKRI et al., 2006; DEL GIUDICE et al., 2009; SANAD et al., 2011; TUSSING-HUMPHREYS et al., 2010) und dadurch das Risiko eines Eisenmangels und einer Anämie erhöht (ZHAO et al., 2015). Bei übergewichtigen Kindern wurde durch eine Erhöhung der Eisenaufnahme eine signifikante Verbesserung des Eisenstatus festgestellt (SANAD et al., 2011).

2.5 *Persicaria odorata* Soják, syn. *Polygonum odoratum*

Polygonum odoratum Lour., neu klassifiziert als *P. odorata* Soják und regional bekannt als vietnamesischer Koriander, Daun Laksa oder Kesom, Laksa Pflanze, Phakpaew/Phakphai und Rau Thom/ Rau Ram oder Knöterich wurde für die vorliegende Arbeit als Versuchspflanze ausgesucht.

2.5.1 Botanische Beschreibung und Kultivierung

P. odorata ist eine mehrjährige, krautige Pflanze und gehört zur Familie Polygonaceae, deren Vertreter bekannt sind für hohe Gehalte an Flavonoiden, Quinonen, Phenylpropanoiden und Terpenoiden (SHEN et al., 2018). Sie kommt ursprünglich aus Südostasien, wo sie in einer feuchten Umgebung auf reichhaltigen, feuchten Boden wächst. Die Pflanzen bevorzugen halbschattige Plätze, tolerieren bei ausreichender Feuchtigkeit auch sonnige Standorte (SHAVANDI et al., 2012). *P. odorata* kann 30-35 cm groß werden und hat rötliche Stängel, die in Sektionen unterteilt sind. Die Blätter sind spitz und 6-15 cm lang, auf der Oberseite grün mit einem dunkelroten Fleck in der Mitte. Die Unterseite ist leicht burgunderrot gefärbt. Durch Kultivierung auf schattigen Anbauflächen können Pflanzen mit größeren und längeren Blättern produziert werden, welche aufgrund ihres Aussehens und des Aromas besser vermarktfähig sind (LEGO et al., 2017).



Abbildung 2.30 a, b: *P. odorata*, Blattoberseite mit typischem Fleck und Blattunterseite mit leichter Burgunderrotfärbung

Eine Vermehrung ist durch Samen oder Stecklinge möglich. Bereits 3-4 Wochen nach der Stecklingsvermehrung kann mit der Ernte der Blätter begonnen werden. Aufgrund der unkomplizierten Kultivierung von *P. odorata* und den vielfältigen Einsatzmöglichkeiten ist die Pflanze in ihren Herkunftsländern in vielen Gärten zu finden. Vorwiegend wird *P. odorata* für den Eigenbedarf angebaut oder in kleinen Mengen zum Verkauf auf lokalen Märkten angeboten (AIRRIESS und CLAWSON, 1994; LEGO et al., 2017). *P. odorata* ist in 27% der Gärten vietnamesischer Flüchtlinge in New Orleans vorhanden und somit genauso häufig auffindbar wie *Ocimum basilicum* (AIRRIESS und CLAWSON, 1994). Außerhalb Asiens ist die *P. odorata* eher unbekannt und nur vereinzelt in Gärtnereien oder Asia-Märkten zu finden.



Abbildung 2.31 a-d: *P. odorata*: (a) kultiviert im Gewächshaus (Berlin Dahlem), (b) geerntete Pflanzen in Vietnam, (c) Anbau von *P. odorata* in einem Hausgarten in Vietnam (d) *P. odorata* wildwachsend an einem Fluss in Vietnam

Der Geschmack der Pflanze wird als scharf und würzig beschrieben. Den zitronigen, grünen, koriander-ähnlichen Geruch erhält *P. odorata* durch Inhaltsstoffe wie (Z)-3-hexenal, (Z)-3-hexenol, Decanal, Undecanal und Dodecanal (CHANSIW et al., 2018; SASONGKO et al., 2011; STARKENMANN et al., 2006).

2.5.2 Verwendung und Bedeutung für die Ernährung

P. odorata findet in der asiatischen Küche Verwendung in Salaten (AHONGSHANGBAM et al., 2014), Fleisch- und Fischgerichten und ist ein essentieller Bestandteil der Singaporeanischen Meeresfrüchte-suppe (STARKENMANN et al., 2006), der vietnamesischen Pho-Suppe und der chinesisch-malaysianischen Nudel-Curry-Laksa (SHAVANDI et al., 2012) (Abbildung 2.32). Aufgrund seines hohen Gehalts an aliphatischen Aldehyden wird *P. odorata* bei der Produktion von Kesom Öl verwendet (SHAVANDI et al., 2012). Daneben enthält *P. odorata* Polygodial, das zur Verstärkung des scharfen Effekt von Allyl Isothiocyanat in Wasabi, der erfrischenden Wirkung von Zahnpasta oder der sensorischen Akzeptanz von künstlichen Süßstoffen verwendet wird (STARKENMANN et al., 2011). In Deutschland ist die Pflanze weniger bekannt, wird jedoch bereits in einigen Gärtnereien als mehrjährige Alternative für *Coriandrum sativum* angeboten. Verwendung findet *P. odorata* auch hier in asiatischen Speisen, z.B. in Suppen.



Abbildung 2.32 a-d: Beispiele für die Verwendung von *P. odorata* in der asiatischen Küche

Neben seinen geschmacklichen Eigenschaften ist die Pflanze aufgrund ihrer gesundheitsfördernden und konservierenden Eigenschaften interessant. Im Fokus vieler Studien standen häufig phenolische Inhaltsstoffe und damit verbundene antioxidative Kapazitäten. Von 20 getesteten thailändischen Gemüsearten hatte *P. odorata* mit 52,0 µg GAE¹/ mg TM den höchsten Polyphenolgehalt und die höchste antioxidative Kapazität (NANASOMBAT und TECKCHUEN, 2009). Ein Polyphenolgehalt von 216,74 µg GAE/ mg TM und ein Flavonoidgehalt von 117,30 µg CE/mg TM wurde von WORARATPHOKA et al. (2012) in *P. odorata* gefunden. AHONGSHANGBAM et al. (2014) bestimmten einen Polyphenolgehalt von 13,03 mg GAE/g TM und einen Flavonoidgehalt von 4,92 mg QE/g TM. Als mengenmäßig am stärksten vorkommende phenolische Komponenten wurden Ellagsäure, Quercetin, Gallussäure, Ferulasäure, Apigenin und p-Cumarinsäure identifiziert. In einer Studie von MAI et al. (2007) wurde der Polyphenolgehalt in Abhängigkeit vom Extraktionsmittel untersucht. Der gefundene Polyphenolgehalt von *P. odorata* lag bei 32,5 mg/g TM (Wasserextrakt) bzw. 64,8 mg/g TM (Methanolextrakt). Bezogen auf die Frischmasse bestimmten ZHENG und WANG (2001) einen Polyphenolgehalt von 3,09 mg GAE/g in *P. odorata*.

Dominierende Flavonoide waren Rutin, Catechin, Quercetin, Kaempferol und Isohammetin. Von 91 untersuchten tropischen oder subtropischen Pflanzen wurde in *P. odorata* mit 144 mg/ 100 g Frischmasse der vierthöchste Flavonoidgehalt gemessen (YANG et al., 2008). Der Carotinoidgehalt von *P. odorata* wurde in einer Studie von CZECHUGA (1987) mit 164,1 µg/ g TM (Schatten) bzw. 128,5 µg/ g

¹ GAE= Gallic acid equivalent; Gallussäure wird häufig als Standard bei der Polyphenolbestimmung verwendet (siehe Abschnitt 4.4.3)

TM (Sonne) angegeben. Die Zusammensetzung in variierte mit der Lichtintensität. Wenig belichtete Blätter hatten einen β -Carotinanteil von 26,6% und einen Luteinanteil von 43,2%. Pflanzen. Eine direkte Sonnenbestrahlung reduzierte den β -Carotinanteil (11,4%) und erhöhte den Luteinanteil (63,4%).

In der traditionellen Medizin wird *P. odorata* bei diversen Verdauungsproblemen eingesetzt (CHANSIW et al., 2019; LEGO et al., 2017) und in Vietnam von buddhistischen Mönchen regelmäßig gegessen um die sexuelle Begierde mindern (LEGO et al., 2017). Heilpraktiker in Bangladesh (Region: Bagerhat) verwenden Pflanzenteile von *P. odorata*, bekannt dort auch als *Bish katal*, zur Behandlung von Hautkrankheiten (Schmerzen, Dermatitis, Entzündungen), als Insektenrepellent und zum Gurgeln als Mundfrischung (MOLLIK, ARIFUL et al., 2010). In der traditionellen Medizin in Thailand ist *P. odorata* zudem als Diuretikum bekannt (AREEKUL und PHOMKAIVON, 2015).

In einer Studie von MAI et al. (2007) wurde eine hemmende Wirkung von Polyphenolen aus *P. odorata* gegenüber der alpha-Glucosidase beobachtet, einem kohlenhydrathydrolysierenden Enzym, das mit der Entstehung von Diabetes assoziiert wird. Bei einer bereits manifestierten Diabetes mellitus zeigte eine Studie mit Ratten eine blutzuckersenkende Wirkung eines Extraktes aus Persicariablättern und Mangosamen, der zugleich antikataraktogenetische und -retinopathische Wirkungen aufwies. Diese wurden auf die antioxidativen Eigenschaften und eine Hemmung der Aldosereduktase zurückgeführt, welche bei Diabetes mellitus durch eine Akkumulation von Sorbit zu Schäden durch einen starken osmotischen Druck führen kann (WATTANATHORN et al., 2017). Ebenfalls assoziiert mit der hohen antioxidativen Kapazität werden cytotoxische Effekte von *P. odorata*-Extrakten auf die Proliferation von MDF-7 Brustkrebszellen (NANASOMBAT und TECKCHUEN, 2009; WORARATPHOKA et al., 2012) und Jurkat-Krebszellen (WORARATPHOKA et al., 2012). Zudem zeigten *P. odorata*-Extrakte von acht untersuchten Thai Pflanzenextrakten die höchsten cytotoxischen Aktivitäten gegenüber menschlichen Kolonadenokarzinom-(HAT-29) und hepatozellulären Karzinomzellen (HepG2), erklärt durch die pro-apoptotischen Effekte der enthaltenen Polyphenolen (PUTTHAWAN et al., 2017). Zudem wurden von CHANSIW et al. (2018) auch anti-hämolytische Aktivitäten nachgewiesen.

Weiterhin zeigten CHANSIW et al. (2018), NAJIAH et al. (2011), NANASOMBAT und TECKCHUEN (2009), SAAD et al. (2014), SASONGKO et al. (2011) und YANG et al. (2007a) hohe antibakterielle Wirkungen von *P. odorata*-Extrakten gegenüber *Staphylococcus aureus*. Daneben wurden hemmende Wirkungen bezüglich *Escherichia coli* (NANASOMBAT und TECKCHUEN, 2009; SAAD et al., 2014; SASONGKO et al., 2011), *Bacillus cereus* (NANASOMBAT und TECKCHUEN, 2009), *Bacillus subtilis* (SAAD ET AL., 2014), *Listeria monocytogenes*, *Pseudomonas fluorescens* und *Yersinia enterocolitica* (NANASOMBAT und TECKCHUEN, 2009), *Salmonella* spp. (SAAD et al., 2014), *Staphylococcus epidermis*, *Enterococcus faecium* und *Enterococcus faecalis* (CHANSIW et al., 2018) nachgewiesen.

3. ZIELSTELLUNG UND AUFGABEN

Ausgehend vom Literaturstudium deutet sich eine nicht-ausreichende Versorgung der Menschen mit pflanzenspezifischen Inhaltsstoffen an, die als essentielle Nährstoffe oder aufgrund nachweislich gesundheitsfördernder Wirkungen einen wichtigen Beitrag bei der Prävention diverser Krankheiten leisten, und somit im Hinblick auf eine alternde Bevölkerung und die damit verbundenen Gesundheitskosten eine wichtige Rolle spielen (siehe Abschnitt 2.4). Da die Aufnahme vieler Mikronährstoffe durch den Verzehr von Obst und Gemüse sehr von persönlichen Präferenzen abhängt, bieten Pflanzen mit einem hohen Nährwert eine Möglichkeit für eine gesteigerte Zufuhr, ohne die Ernährungsgewohnheiten weitgreifend zu ändern. Auch ermöglicht eine Ergänzung der Ernährung mit Lebensmitteln, die hohe Mikronährstoffgehalte beinhalten, dem prognostizierten verringerten Verzehr an Obst und Gemüse und der resultierenden reduzierten Aufnahme pflanzenspezifischer Mikronährstoffe entgegenzuwirken, die durch das Bevölkerungswachstum und eine verringerte Verfügbarkeit an agrarwirtschaftlichen Produkten aufgrund des Klimawandels erwartet werden. Eine weitgehend regionale, saisonunabhängige Produktion wäre erstrebenswert, wird jedoch erschwert durch die Verfügbarkeit der Ressource Licht, die nicht nur als Energiequelle für die Photosynthese dient (siehe Abschnitt 2.2.1), sondern durch Intensität und spektraler Zusammensetzung viele Prozesse reguliert (siehe Abschnitt 2.2.2) und nachgewiesene Effekte auf einzelne Inhaltsstoffe hat (siehe Abschnitt 2.3). Bei einer vorrausgehenden, weitgreifenden Literaturrecherche fiel auf, dass (1) meist die Beeinflussung einer Inhaltsstoffgruppe untersucht, (2) selten eine Differenzierung bezüglich des Einflusses einer veränderten Lichtintensität und spektralen Lichtzusammensetzung vorgenommen wurde und (3) Mineralstoffe mit Ausnahme dreier Konferenzbeiträge keine Beachtung fanden.

3.1 Ziele

Bei der Untersuchung einer Beeinflussung des Nährwertes durch das Licht gilt es jedoch mehrere Kriterien zu berücksichtigen:

- 1) Der Nährwert einer Pflanze definiert sich über ein breites Spektrum an Inhaltsstoffen, die unterschiedlich durch einzelne Lichtbedingungen beeinflusst werden können.
- 2) Neben Vitaminen und antioxidativ wirksamen Inhaltsstoffen sind auch Mineralstoffe Bestandteil des Nährwertes, welche als Mitverursacher der weltweiten Mangelernährung häufig zu wenig Beachtung finden (STEIN, 2010).
- 3) Sowohl die Bestrahlungsstärke über das gesamte Lichtspektrum als auch bestimmte Bereiche können die Inhaltsstoffakkumulation beeinflussen. Die Lichteigenschaften sollten deswegen differenziert betrachtet werden.

Vor diesem Hintergrund ist geplant, den Nährwert von *P. odorata* durch Modifikation der spektralen Lichtzusammensetzung und Lichtintensität zu verbessern. Durch Betrachtung eines breiten Inhaltsstoffspektrums und Variationen der Lichtbedingungen, einschließlich der Grundbelichtung, soll mit Hilfe des Vergleichs mehrerer Versuchsreihen und durch Anwenden verschiedener statistischer Auswertungsmethoden die Beeinflussung des Nährwerts der Pflanze durch ausgewählte Lichteigenschaften beschrieben werden, insbesondere im Hinblick auf eine differenzierte Beeinflussung durch Bestrahlungsstärke und spektrale Lichtzusammensetzung. Unter dem Aspekt einer platz-, möglicherweise auch energiesparenden Alternative zur Gewächshausproduktion, soll ein besonderer Fokus auf der Bewertung von Erträgen und Nährwert von Pflanzen liegen, die unter vollständig kontrollierten Bedingungen gewachsen sind und somit ein Äquivalent für Produkte des Indoor-Farmings darstellen.

3.2 Aufgaben

Aus der Zielsetzung ergeben sich folgende Aufgaben:

- 1) Beeinflussungen der Lichtintensität und der spektralen Lichtzusammensetzung sollten bei Konstanthaltung anderer relevanter Bedingungen erreicht werden.
 - a. Die Ausrichtung erfolgt durch Versuche im Gewächshaus praxisnah. Alle Pflanzen einer Versuchsreihe haben die gleichen Bedingungen, zwischen Versuchsreihen kann es zu Schwankungen bezüglich Tageslichtsumme, Temperatur und Luftfeuchtigkeit kommen.
 - b. Ergänzende Versuche unter kontrollierten Bedingungen in einer Klimakammer ermöglichen eine Kontrolle aller Kultivierungsbedingungen und können im Hinblick auf Indoor-Farming-Systeme von Interesse sein.
- 2) Die Beeinflussung der Untersuchungsparameter durch die Bestrahlungsstärke, ohne Veränderung der spektralen Lichtzusammensetzung, wird anhand des Vergleiches von Kontrollen, die bei unterschiedlichen Tageslichtsummen/ PAR-Werten kultiviert werden, untersucht.
- 3) Für eine separate Betrachtung des Einflusses einzelner Spektralbereiche (blau, grün, rot) finden monochromatische LEDs Anwendung.
- 4) Um die Beeinflussung der Wachstumsparameter und Inhaltsstoffgehalte durch den grünen Spektralbereich zu erfassen, werden zudem photoselektive Folien verwendet, die eine hohe Durchlässigkeit für blaues und rotes Licht als photosynthetisch bedeutende Spektralbereiche und eine geringe Transparenz für den grünen Spektralbereich aufweisen.
- 5) Um Wirkungen unterschiedlicher Lichtintensitäten und einer veränderten spektralen Lichtzusammensetzung differenziert zu betrachten bzw. diese vergleichbar zu machen, werden verschiedene statistische Auswertungsmethoden angewandt.

- 6) In allen Versuchsreihen sollen die Verschiebungen der einzelnen Inhaltsstoffgruppen zueinander untersucht werden in Hinsicht auf den Gesamteffekt der Lichtmodifikation auf den Nährwert.

3.3 Hypothesen

Auf Grundlage der vorausgegangenen Literaturrecherche ergeben sich folgende Hypothesen:

- 1) Geringe Lichtintensitäten der photosynthetisch relevanten Spektralbereiche führen zu geringeren Frisch- und Blattmassen. Entsprechend bewirken geringere Tageslichtsummen in der Klimakammer eine Reduktion der Erträge im Vergleich zum Gewächshaus.
- 2) Blaue und rote Spektralbereiche werden durch Chlorophylle absorbiert und fördern deswegen das Pflanzenwachstum.
- 3) Hohe Lichtintensitäten führen zu höheren Inhaltsstoffgehalten.
- 4) Blaue und rote Spektralbereiche liegen in den Absorptionsspektren der Photorezeptoren. Folglich führen Erhöhungen der Blau- und Rotlichtanteile zu Steigerungen der Inhaltsstoffgehalte und des Nährwertes der Pflanzen.
- 5) Grünes Licht, wie auch ein niedriges R:FR-Verhältnis und ein geringer Blaulichtanteil, sind Indikatoren für Schattenbedingungen und führen zu Schattenvermeidungssymptomen. Entsprechend kommt es zu einer reduzierten Biomassebildung und geringeren Gehalten antioxidativ wirksamer Substanzen.
- 6) Sowohl die antioxidativ wirksamen Inhaltsstoffe als auch die Mineralstoffe, sind relevant für die photosynthetische Energiegewinnung und insbesondere für den Schutz vor photooxidativen Schädigungen. Folglich sollten die Inhaltsstoffe insgesamt ähnlich auf die Lichtbedingungen reagieren.

4. MATERIAL UND METHODEN

Für die Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Lichtspektren auf die nutritive Qualität von *P. odorata* wurde eine Auswahl organischer und anorganischer Inhaltsstoffe bestimmt, die eine hohe Relevanz für die menschliche Ernährung haben. Neben den Inhaltsstoffanalysen wurden das Pflanzenwachstum und die Biomassebildung dokumentiert. *P. odorata* wurde verwendet aufgrund der problemlosen Kultivierung, einem hohen Nährwert (siehe Abschnitt 2.5) sowie Reaktionen der Inhaltsstoffgehalte und des Pflanzenwachstums auf verschiedene Lichtbedingungen in Vorversuchen.

Für die Versuche werden zwei Standorte ausgewählt, die für einen regionalen Anbau von Gemüsekräutern geeignet sind. Als Äquivalent für Indoor-Farmen werden Versuche unter vollständig kontrollierten Bedingungen in Klimakammern durchgeführt. Die Kontrollvariante wird unter Leuchtstoffröhren, ohne zusätzliche LEDs oder Überdeckung mit Folien, kultiviert (FL). Da aus Platzgründen in der Klimakammer nicht alle Versuche gleichzeitig durchgeführt werden können und die Bestrahlungsstärken der Leuchtstoffröhren sich bei den Durchführungen unterscheidet, hat jede LED- bzw. Folienvariante in der Klimakammer eine eigene Kontrolle (FLr / FLg / FLb bzw. FLh2 / FLp2 / FLh1 / FLp1). Als zweiter Standort werden mehrere Versuchsreihen im einem Glasgewächshaus durchgeführt. Die Kontrollen der Gewächshausversuche werden unter natürlichem Sonnenlicht ohne Lichtmodifizierung kultiviert (NL).

Die Lichtmodifizierung wird durch eine Ergänzung der Grundbelichtung mit monochromatischen LEDs (Abbildung 4.1, Abbildung 4.2) bzw. durch eine Überdeckung der Pflanzen mit photoselektiven Folien (Abbildung 4.3, Abbildung 4.4) erreicht.

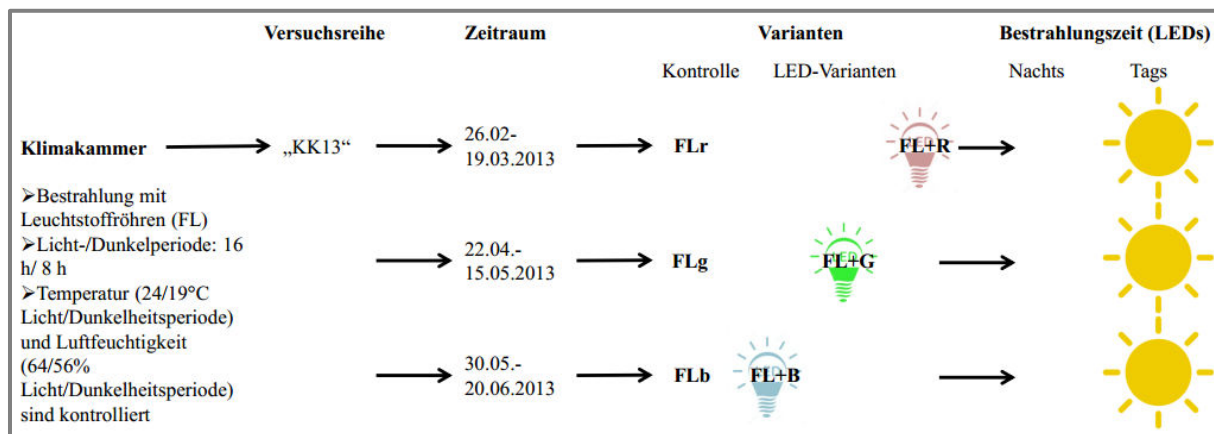


Abbildung 4.1: Überblick über Versuchsreihen in der Klimakammer mit zusätzlicher LED-Bestrahlung; angegeben sind die Wachstumsbedingungen, der Zeitraum der jeweiligen Versuche und die durchgeführten Varianten: FL+R steht für eine Ergänzung der Grundbelichtung durch rote LEDs, FLr ist die zugehörige Kontrolle ohne LEDs; FL+G steht für eine Ergänzung der Grundbelichtung durch grüne LEDs, FLg ist die zugehörige Kontrolle ohne LEDs; FL+B steht für eine Ergänzung der Grundbelichtung durch blaue LEDs, FLb ist die zugehörige Kontrolle ohne LEDs.

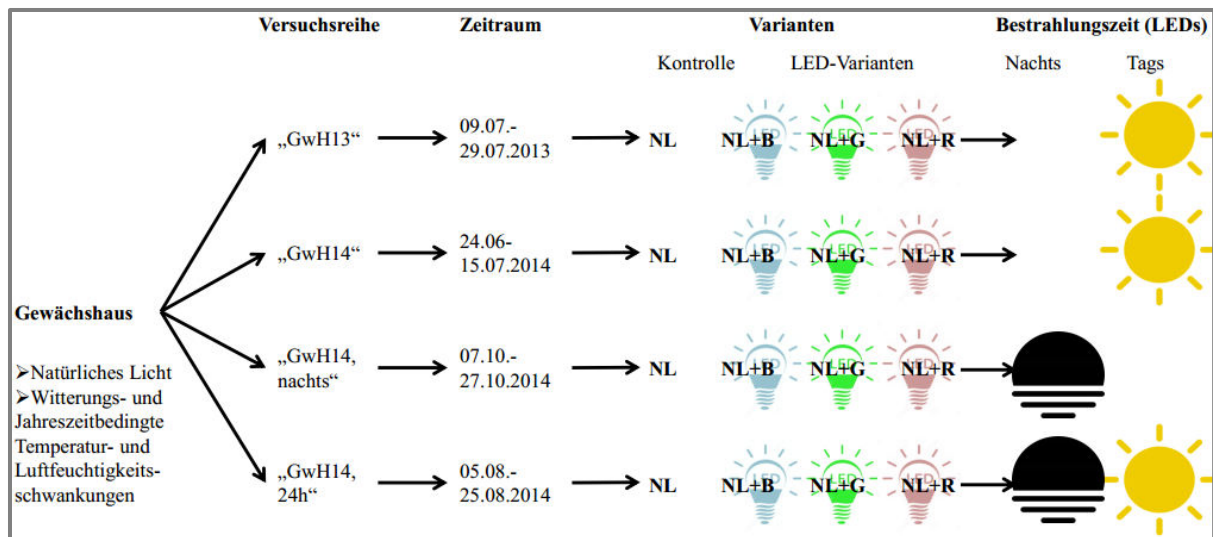


Abbildung 4.2: Überblick über Versuchsreihen im Gewächshaus mit zusätzlicher LED-Bestrahlung; angegeben sind die Versuchsreihen mit dem jeweiligen Zeitraum und die durchgeführten Varianten: die Bestrahlungszeit zeigt an, ob die zusätzliche Bestrahlung tagsüber („Sonne“), nachts („Dunkelheit“) oder gantztätig („Sonne“ und „Dunkelheit“) stattgefunden hat; NL=Natürliches Licht, ohne zusätzliche LEDs (=Kontrollvariante), NL+B=Natürliches Licht + blaue LEDs, NL+G=Natürliches Licht + grüne LEDs, NL+R=Natürliches Licht + rote LEDs

Aufgrund der Einbindung der Arbeit in das Projekt „Energieeffizientes Gewächshaus durch lichtaktive Nanofolie“ werden zusätzlich Lichtmodifizierungen durch photoselektive Folien untersucht. Diese beeinflussen neben dem Lichtspektrum auch die Lichtintensität, welche in den Klimakammern durch Variation der Abstände zwischen Pflanzen und Leuchtstoffröhren eingestellt werden kann (Abbildung 4.3).

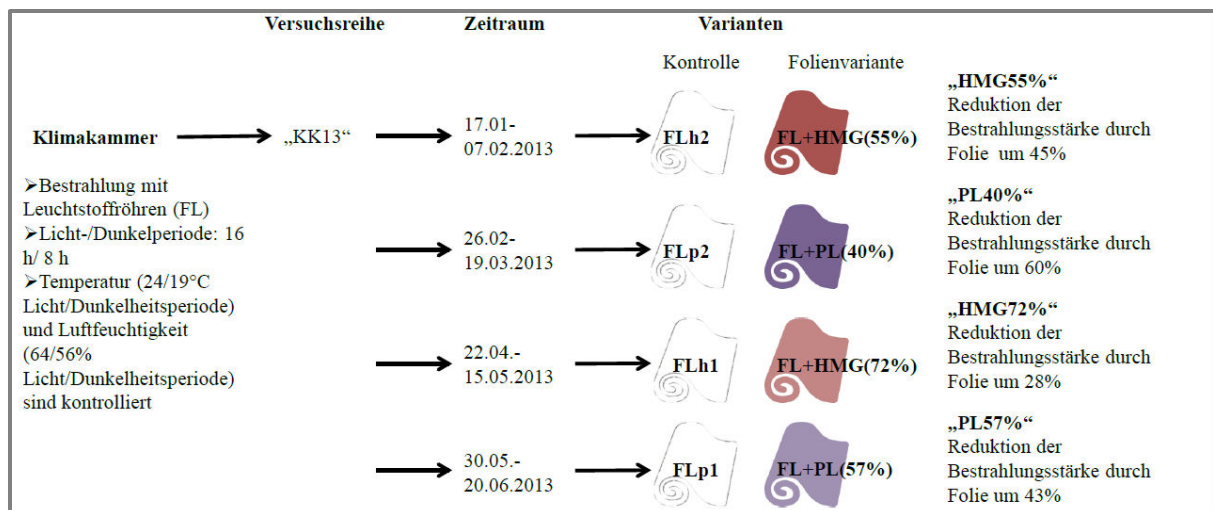


Abbildung 4.3: Überblick über Versuchsreihen in der Klimakammer mit Lichtmodifikationen durch photoselektive Folien; angegeben sind die Wachstumsbedingungen, der Zeitraum der jeweiligen Versuche und die durchgeführten Varianten: farblose Folien: ohne Lichtmodifizierung, entspricht den Kontrollbedingungen; FL+HMG55%= Überdeckung der Pflanzen mit der Half Minus Green-Folie, erreichte Lichtintensität: 55% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLh2), FL+PL40%= Überdeckung der Pflanzen mit der Pale Lavander-Folie, erreichte Lichtintensität: 40% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLp2), FL+HMG72%= Überdeckung der Pflanzen mit der Half Minus Green-Folie, erreichte Lichtintensität: 72% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLh1), FL+PL57%= Überdeckung der Pflanzen mit der Pale Lavander-Folie, erreichte Lichtintensität: 57% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLp1)

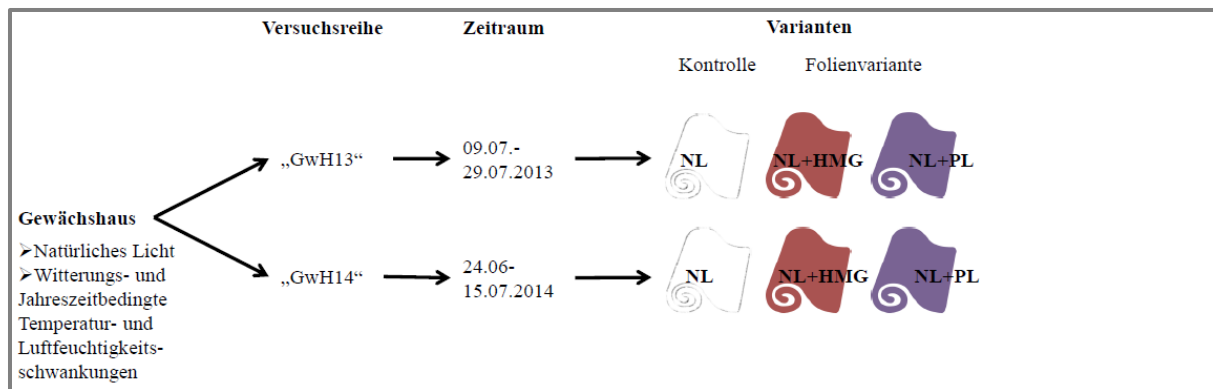


Abbildung 4.4: Überblick über Versuchsreihen im Gewächshaus mit Lichtmodifikationen durch photo-selektive Folien; angegeben sind die Versuchsreihen mit dem jeweiligen Zeitraum und die durchgeführten Varianten: farblose Folien: ohne Lichtmodifizierung, entspricht den Kontrollbedingungen (=NL); NL+HMG= Überdeckung der Pflanzen mit der Half Minus Green-Folie, NL+PL= Überdeckung der Pflanzen mit der Pale Lavander-Folie

Es gibt eine Vielzahl an Lichteigenschaften mit Relevanz für die Pflanzenentwicklung. In Anlehnung an Abschnitt 2.1.1 gehören die Tageslänge, einschließlich der Dauer der Dämmerungsphasen, Lichtintensitäten im Tagesverlauf im Hinblick auf Maximalwerte während des Sonnenhöchststandes und Schwankungen, sowie die spektrale Lichtzusammensetzung. Da es nicht möglich war, die Beeinflussung der Untersuchungsparameter durch alle Lichteigenschaften zu untersuchen, beziehen sich die Lichteigenschaften in der vorliegenden Arbeit auf die Lichtintensität und die spektrale Lichtzusammensetzung. Die Lichtintensität wird anhand der Tageslichtsumme und/ oder des PAR-Wertes beschrieben. Der PAR-Wert wird als photosynthetische Photonenstromdichte (PPFD) angegeben, welche ausdrückt, wie viele Photonen (μmol) auf einer Fläche (m^2) in einer bestimmten Zeit (s) auftreten. Im Gewächshaus wird die Lichtintensität hingegen bestimmt durch die Tageslänge, unterschiedliche Bestrahlungsstärken im Tagesverlauf und die Witterung. Deswegen wird als Maßzahl die integrierte Bestrahlungsstärke über den gesamten Tagesverlauf herangezogen, die Tageslichtsumme. Für eine bessere Vergleichbarkeit wird auch die jeweilige Tageslichtsumme für die Bedingungen in der Klimakammer berechnet.

Die Einteilung des Lichtspektrums erfolgt anhand der Wellenlänge der Photonen und ihrer farberzeugenden Wirkung. Unterschieden wird zwischen Blau, Grün und Rot, die zusätzlich in „kurzwelligen“ und „langwelligen“ Bereiche unterteilt werden (Abbildung 4.5). Des Weiteren werden Verhältnisse aus Spektralbereichsbereichen berechnet, sowie das R:FR-Verhältnis, beruhend auf den maximalen Absorptionseigenschaften der inaktiven und aktiven Phytochrome (siehe Abschnitt 2.2.2).

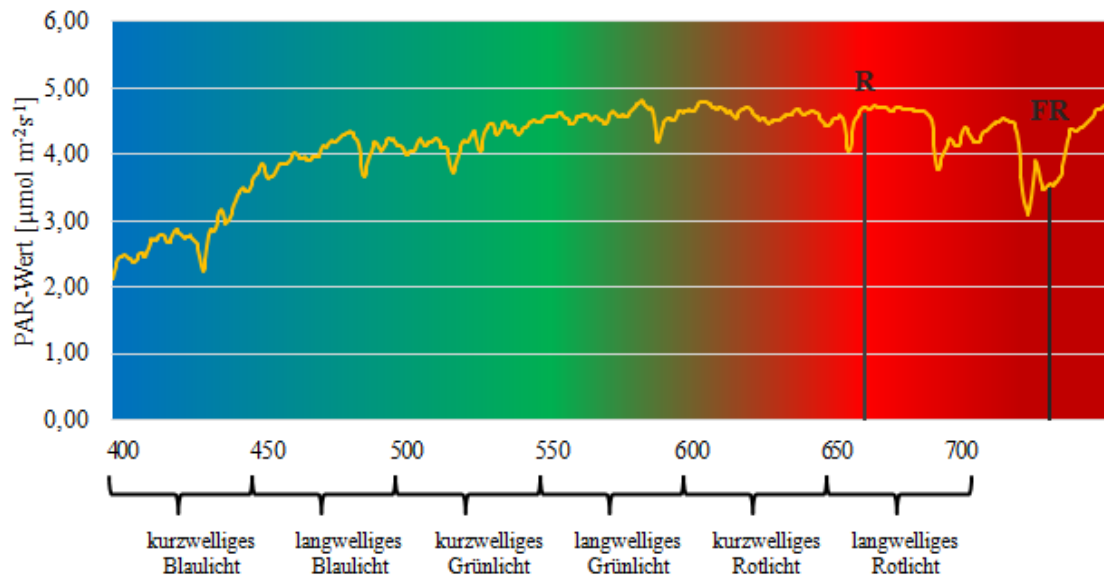


Abbildung 4.5: Verwendete Charakterisierung der spektralen Lichtzusammensetzung: 401-450 nm \triangleq kurzwelliges Blaulicht, 451-500 nm \triangleq langwelliges Blaulicht, 501-550 nm \triangleq kurzwelliges Grünlicht, 551-600 nm \triangleq langwelliges Grünlicht, 601-650 nm \triangleq kurzwelliges Rotlicht, 651-700 nm \triangleq langwelliges Rotlicht; 401-500 nm : 601-700 nm \triangleq B:R; 401-500 nm : 501-600 nm \triangleq B:G; 601-700 nm : 501-600 nm \triangleq R:G; (401-500 nm + 601-700 nm) : 501-600 nm \triangleq BR:G; 660:730 nm \triangleq R:FR-Verhältnis; Verwendeter Graph: Lichtspektrum der territorialen Solarstrahlung in Berlin Dahlem, Lentzeallee 75; eigene Messungen am 14.08.2018 um 12:00 Uhr; gemessen mit dem SpectraWiz Spectroradiometer PS-100

4.1 Pflanzenmaterialien

Aufgrund der unkomplizierten Kultivierung, der schnellen vegetativen Entwicklung, seines Inhaltsstoffspektrums und der Bedeutung für den asiatischen Markt wurde als Pflanzenmaterial *P. odorata* ausgewählt (siehe Abschnitt 2.5).

Alle *P. odorata* Stecklinge für Gewächshaus- und Klimakammerversuche stammen von einer Mutterpflanze, die von Richters Herbs (Goodwood, Kanada) erworben und im Gewächshaus der Humboldt Universität in Berlin Dahlem kultiviert wurde. Durch die vegetative Vermehrung werden genetisch identische Pflanzen reproduziert, die einen Einfluss genetischer Variationen auf die Untersuchungsergebnisse ausschließen. Zudem ist das Verfahren schneller als die generative Vermehrung und gängig bei der Vermehrung von *P. odorata* in Gärtnereien. Die Stecklinge wurden in einen 35-Zellen Tray (44 cm x 28 cm x 5.5 cm) gepflanzt und zunächst im Gewächshaus kultiviert. Nach zehn Tagen fand die Umsetzung der Pflänzchen in Mitscherlichgefäße (6 Liter) statt. Die Dochtbewässerung, die bei den Mitscherlichgefäßen eingesetzt wird, bewirkte während des gesamten Versuchszeitraums eine gleichbleibende und bedarfsgerechte Versorgung mit Nährlösung. Für die Klimakammerversuche wurden pro Variante vier Mitscherlichgefäße à 4 bzw. 5 Pflanzen verwendet. Bei den Gewächshausversuchen kamen pro Variante sechs Mitscherlichgefäße à 3 bzw. 5 Pflanzen zum Einsatz.

4.2 Weitere Versuchsmaterialien

Die Verwendung eines standardisierten Substrates (Gramoflor Profi Substrat, Tabelle 4.1) stellt einheitliche Bedingungen bei allen Versuchsreihen sicher. Mit wenig zersetztem Weißtorf und stark zersetztem Schwarztorf als Hauptbestandteile werden hohe Luftkapazitäten, Wasser- und Nährstoffspeichereigenschaften erreicht. Gleichzeitig ist Torf relativ frei von Pflanzenteilen und Krankheitserregern und zeichnet sich durch einen geringen pH-Wert und Nährstoffgehalt aus (ROBERTSON, 1993). Durch die Beimischung des porösen, mineralstofffreien Vulkangesteins Perlite wird ein ausgeglichener Feuchtigkeitshaushalt und eine verbesserte Belüftung erzielt (OLYMPIOS, 1992). Um eine ausreichende Nährstoffversorgung in dem mikronährstoffarmen Torf-Perlitsubstrat (Penningsfeld, 1983; Robertson, 1993) zu gewährleisten, wurde bei Bedarf eine Nährlösung in den Untersatz der Mitscherlichgefäße gegeben. Die Zusammensetzung der Basisnährlösung (Tabelle 4.2) stellte eine ausreichende Versorgung mit Makroelementen und Eisen sicher. Unter Berücksichtigung der Nährstoffgehalte im Wasser wurden die Mengen der benötigten Düngemittel, Salze und Säuren mit dem HYDROFER Computerprogramm berechnet (BÖHME, 1993). Die Basisnährlösung wurde etwa im Verhältnis 1:480 mit Wasser gemischt, bis zum Erreichen eines EC-Wert von 1,5 mS/cm. Der pH-Wert wurde mit Phosphorsäure auf pH 5,8 eingestellt.

Tabelle 4.1: Spezifikation des verwendeten Substrates „Gramoflor Profi Substrat“

Zusammensetzung	weißer Torf 65%, schwarzer Torf 20%, Perlite 15%
Organisches Material	< 90% (C 34%; N 0,2%)
EC	10-120 mS/m
pH	5,2-6,0
Feuchtigkeit	min. 30%, max. 80%
Granulation	0-45 mm

Tabelle 4.2: Zusammensetzung der Basisnährlösung

Nährstoff	ppm
N	110
P	50
K	225
Ca	120
Mg	80
Fe	10
HCO₃	90
SO₄	60

4.3 Versuchsaufbau

Vor der Kultivierung unter Versuchsbedingungen wurden die Pflanzen nach dem Umsetzen in die Mitscherlichgefäße eine Woche unter den jeweiligen Kontrollbedingungen akklimatisiert:

- Klimakammerversuche: Beleuchtung mit Leuchstoffröhren, Beleuchtungsdauer (16/ 8 h Licht-/Dunkelperiode), Temperatur (24/19°C Licht-/Dunkelperiode), Luftfeuchtigkeit (64/56% Licht-/Dunkelperiode) (siehe Abschnitt 4.3.1)
- Gewächshausversuche: Sonne als Lichtquelle, PAR-Wert und –dauer, sowie Temperatur und Luftfeuchtigkeit unterliegen natürlichen Schwankungen (siehe Abschnitt 4.3.2)

Täglich wurde die Versorgung mit Nährlösung überprüft und der PAR-Wert gemessen. Im 5-Minuten-Takt wurde im Gewächshaus zudem automatisch die Temperatur und Luftfeuchtigkeit und außerhalb des Gewächshauses die Lichtmenge [klx/m²] aufgezeichnet. Wöchentlich erfolgten Analysen der organischen Inhaltsstoffe (Carotinoide, Chlorophyll, Ascorbinsäure, Polyphenole, Flavonoide, Anthocyane und die antioxidative Kapazität). Zudem wurde das Pflanzenwachstum über die Veränderung der Trieblänge dokumentiert (Abbildung 4.6).

Nach drei Wochen unter Versuchsbedingungen wurde geerntet und Frisch- und Blattmasse sowie der Trockenmassegehalt bestimmt. Neben der Untersuchung der organischen Inhaltsstoffe in der Blattmasse wurden bei zwei Versuchsreihen („KK13“ und „GwH13“) in der Trockenmasse Gehalte an Mineralstoffen (Calcium, Eisen, Kalium, Phosphor, Magnesium) und Nitrat analysiert.

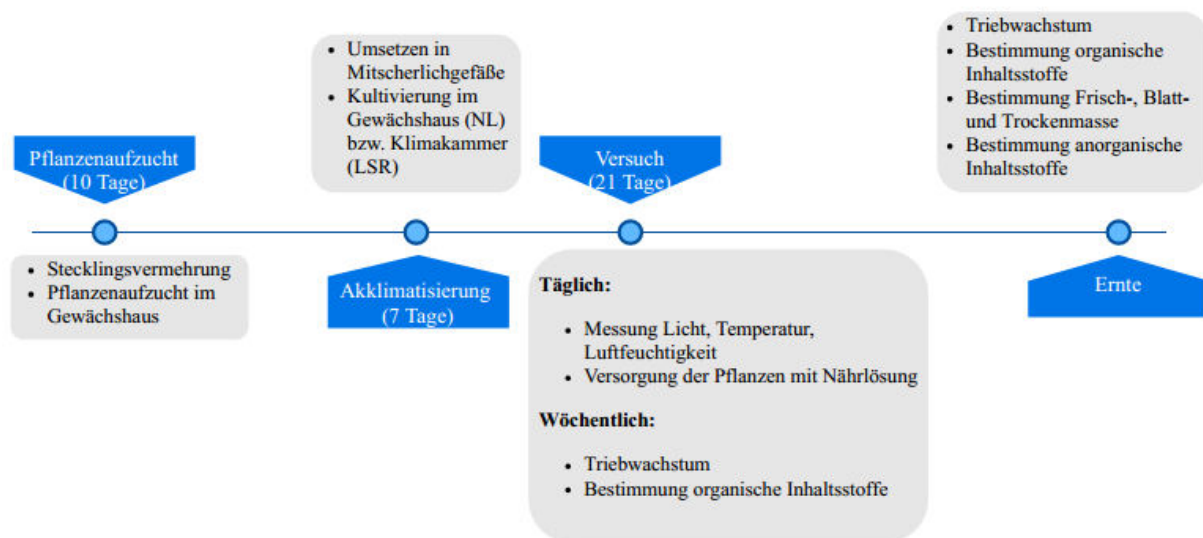


Abbildung 4.6: Zeitplan für die Versuchsdurchführung und Untersuchungen der Inhaltsstoffe, Pflanzenwachstumsparameter sowie der Kultivierungsbedingungen

4.3.1 Versuchsbedingungen in Klimakammern

In der Klimakammer können alle Kultivierungsbedingungen (Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Beleuchtungsdauer und –intensität) gesteuert, störende Einflussfaktoren ausgeschlossen werden. Die Lichtbedingungen unterscheiden sich vom Sonnenlicht u. a. im Hinblick auf die spektrale Lichtzusammensetzung (Abbildung 2.1, Abbildung 2.10) und Schwankungen im Tagesverlauf (Abbildung 2.2). Anwendung finden vollständig kontrollierbare Kultivierungsbedingungen in Indoor-Farming Systemen, wodurch eine saisonunabhängige, ressourcenschonende Pflanzenproduktion mit gleichbleibender Qualität auch auf engem urbanem Raum möglich ist (DESPOMMIER, 2009; KALANTARI et al., 2018; TOULIATOS et al., 2016; YEH und CHUNG, 2009).

Die Beleuchtungsdauer entsprach mit 16 Stunden (8 Stunden Dunkelperiode) in etwa der Tageslänge im Mai bzw. Juli in Deutschland. Daneben wurden Temperatur (24/19°C Licht/Dunkelheitsperiode) und

Luftfeuchtigkeit (64/56% Licht/Dunkelheitsperiode) eingestellt. Die Temperaturen lagen etwa im Bereich der Durchschnittstemperaturen in Vietnam, einem der Herkunftsländer von *P. odorata* (20-30°C; HIEN et al., 2002), die Luftfeuchtigkeiten etwas unterhalb der durchschnittlichen Werte für Vietnam (>75%; HIEN et al., 2002).

Die Beleuchtung erfolgte mit Hilfe von 14 Dreiband-Leuchtstoffröhren F58W/827 (Sylvania, Luxline Plus, Germany), die sich einen Meter oberhalb der Stellfläche für die Gefäße befanden. Der durchschnittliche PAR-Wert lag 20 cm oberhalb des Bodens bei 190,06-81,17 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (gemessen mit dem Chlorophyll Fluorimeter PAM-2000). Somit gab es eine deutliche Abnahme im Zeitverlauf (Tabelle 4.3) mit einer monatlichen Verringerung der Strahlungsleistung von etwa 14%. Die Varianten mit zusätzlicher LED-Beleuchtung wurden unter gleichen Bedingungen in einer zweiten Klimakammer durchgeführt, wobei die PAR-Wert der Leuchtstoffröhren leicht abwich (Tabelle 4.8)

Tabelle 4.3: Mittlere PAR-Werte der Kontrollbeleuchtung, gemessen 20 cm über dem Boden, jeweils am ersten Tag des Versuchszeitraums (Leuchtstoffröhren ohne LEDs oder lichtmodifizierenden Folien) bei den einzelnen Versuchsreihen, gemessen mit dem Chlorophyll Fluorimeter PAM-2000

Bezeichnung der Kontrolle	Variante(n)	Zeitraum	PAR-Wert (Kontrollbeleuchtung)
FLh2	FL+HMG55%	17.01.-07.02.2013	190,06 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$
FLr/ FLp2	FL+R FL+PL40%	26.02.-19.03.2013	157,31 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$
FLg/ FLh1	FL+G FL+HMG72%	22.04.-15.05.2013	113,10 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$
FLb/ FLp1	FL+B FL+PL57%	30.05.-20.06.2013	81,17 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$

Verwendete Abkürzungen: FL+HMG55%= Überdeckung der Pflanzen mit der Half Minus Green-Folie, erreichte Lichtintensität: 55% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLh2), FL+PL40%= Überdeckung der Pflanzen mit der Pale Lavander-Folie, erreichte Lichtintensität: 40% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLp2), FL+HMG72%= Überdeckung der Pflanzen mit der Half Minus Green-Folie, erreichte Lichtintensität: 72% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLh1), FL+PL57%= Überdeckung der Pflanzen mit der Pale Lavander-Folie, erreichte Lichtintensität: 57% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLp1); FL+R= Ergänzung der Grundbelichtung durch rote LEDs (zugehörige Kontrolle: FLr), FL+G= Ergänzung der Grundbelichtung durch grüne LEDs (zugehörige Kontrolle: FLg), FL+B= Ergänzung der Grundbelichtung durch blaue LEDs (zugehörige Kontrolle: FLb)

Die verwendeten Dreibandleuchtstoffröhren hatten ihre Emissionsmaxima im blauen (435 nm), grünen (545 nm) und roten (611 nm) Bereich (Abbildung 4.7).

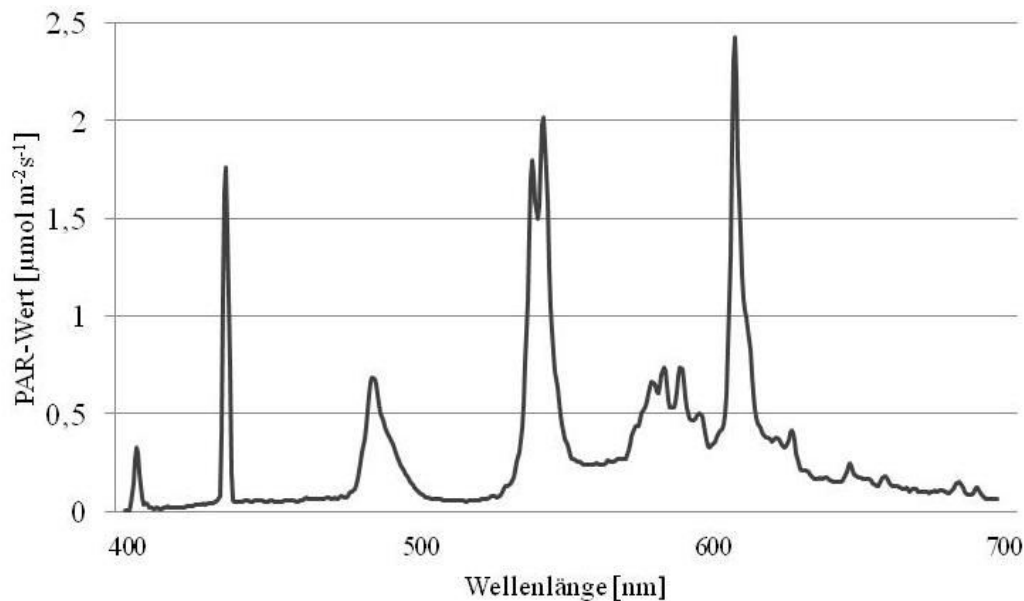


Abbildung 4.7: Lichtspektrum der Leuchtstoffröhren F58W/827 (Sylvania, Luxline Plus, Germany), gemessen mit dem AvantesAvaSpec NIR 256 Spektrometer

4.3.2 Versuchsbedingungen im Gewächshaus

Die Versuchsdurchführung im Gewächshaus ermöglicht eine gewisse Kontrolle der Kultivierungsbedingungen, die jedoch auch natürlichen, witterungsbedingten Schwankungen unterliegen. Unterschiedliche Bestrahlungsdauern und -stärken sowie verschiedene Temperaturen und Luftfeuchtigkeiten müssen bei einem Vergleich der Versuchsreihen untereinander beachtet werden.

Die Versuche wurden in einem Versuchsgewächshaus der Humboldt Universität in Berlin-Dahlem durchgeführt. Alle Varianten einer Versuchsreihe liefen parallel. Dadurch können Variationen der Bedingungen innerhalb der Versuchsreihe ausgeschlossen werden. Die Bestrahlungsstärke des Sonnenlichtes wird durch die Gewächshausbeglasung um ca. 18,5% herabgesetzt, ohne Beeinflussung der spektralen Lichtzusammensetzung (Abbildung 4.8, Tabelle 4.4). Zudem wurde bei Lichtintensitäten >40 klx (entspricht etwa $740 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ PAR-Wert; berechnet nach MEYER, 1996) oder Temperaturen $>30^\circ\text{C}$ automatisch ein Energieschirm ausgefahren, der den PAR-Wert um etwa 85% verringert, ebenfalls ohne die spektralen Lichtzusammensetzung zu verändern (Abbildung 4.8, Tabelle 4.4).

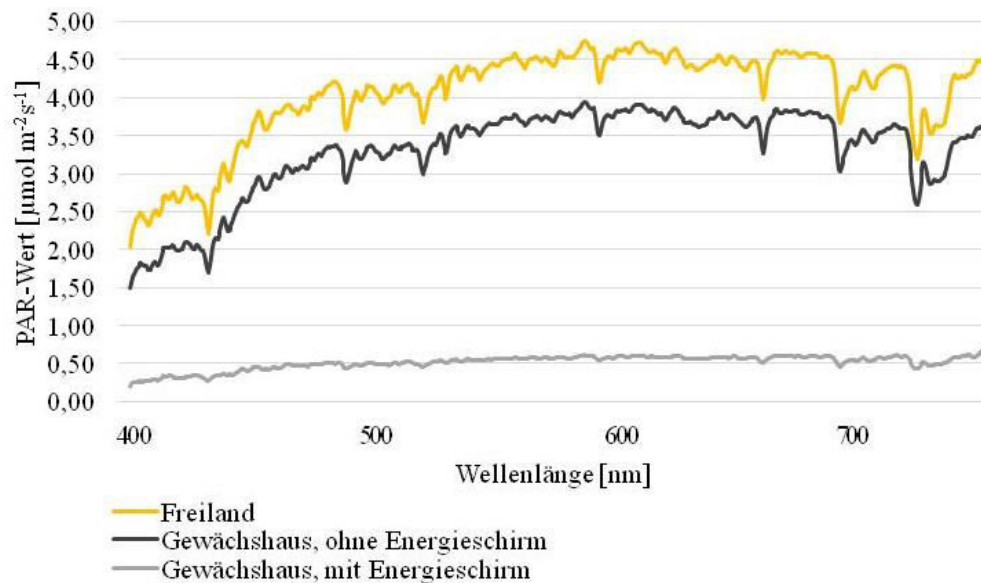


Abbildung 4.8: Lichtspektrum im Freiland vs. Gewächshaus (ohne und mit Energieschirm); gemessen am 06.08.2018 um 12:30 Uhr mit dem SpectraWiz Spectroradiometer PS-100, Witterung: sonnig

Tabelle 4.4: spektrale Lichtzusammensetzung im Freiland vs. Gewächshaus (GwH) ohne und mit Energieschirm; gemessen am 06.08.2018 um 12:30 Uhr mit dem SpectraWiz Spectroradiometer PS-100; Witterung: sonnig

Variante*	PAR-Wert [$\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$]	Anteile der einzelnen Spektralbereiche an der Gesamtbestrahlungsstärke [%]						Verhältnisse zwischen Spektralbereichen				
		401- 450	451- 500	501- 550	551- 600	601- 650	651- 700	B:R	BR:GB:G	R:G	R:FR	**
Freiland	1215	11,44	16,13	17,16	18,62	18,63	18,03	1,03	0,74	1,80	0,77	1,22
GwH, ohne Energieschirm	990	10,62	15,79	17,27	18,97	19,00	18,35	1,03	0,71	1,76	0,73	1,26
GwH, mit Energieschirm	153	10,79	15,59	17,05	18,89	19,04	18,64	1,05	0,70	1,78	0,73	1,16

* Verhältnis PAR-Werte bei 660 nm:730 nm

Im Gewächshaus wurden in den Jahren 2013 und 2014 insgesamt 4 Versuchsreihen durchgeführt. In allen Versuchsreihen wurden die Lichtbedingungen durch Verwendung zusätzlicher LEDs verändert, wobei die Bestrahlungszeit und -dauer variierte (Tabelle 4.5). In zwei Versuchsreihen wurde das natürliche Licht durch photoselektive Folien modifiziert.

Tabelle 4.5: Überblick über die Versuchsreihen im Gewächshaus

	„GwH13“	„GwH14“	„GwH14, nachts“	„GwH14, 24h“
Durchgeführte Versuche	LEDs, Folien	LEDs, Folien	LEDs	LEDs
Zeitpunkt des Versuches	09.07.2013-29.07.2013	24.06.2014-15.07.2014	07.10.2014-27.10.2014	05.08.2014-25.08.2014
Versuchslänge	3 Wochen	3 Wochen	3 Wochen	3 Wochen
Dauer der LED-Beleuchtung	5.00-21.00 Uhr (16 h)	5.00-21.00 Uhr (16 h)	18.00-6.00 Uhr (12 h)	0.00-0.00 Uhr (24h)

Bedingt durch Versuchsmonat und Witterungsverhältnisse variierten die Lichtbedingungen zwischen den Versuchsreihen. Dokumentiert wurde dies durch tägliche Messungen des PAR-Wertes (Tabelle 4.6). Als Maß für die Belichtungsbedingungen können zudem Wetterdaten der Wetterstation Berlin Dahlem und die gemessenen Lichtmengen außerhalb des Gewächshauses herangezogen werden.

Dadurch können im Gegensatz zu den punktuell gemessenen PAR-Werten die Bedingungen des gesamten Tages abgebildet werden, jedoch werden Modifikationen durch Beglasung, Energieschirm und Natriumhochdrucklampen nicht berücksichtigt.

Die Lichtbedingungen unterschieden sich deutlich zwischen meisten den Versuchsreihen. Lediglich die Werte bei den Versuchsreihen „GwH14“ und „GwH14, 24h“ waren vergleichbar

Tabelle 4.6: mittlere PAR-Werte [$\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$] im Gewächshaus (Messgerät: Chlorophyll Fluorimeter PAM-2000), gemessen zu drei Tageszeiten und Sonnenscheinstunden (gesamt und gemittelt) während der Versuchszeiträume:

	Mittlere PAR-Werte [$\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$]			Sonnenscheinstunden*	
	8:30 Uhr	12:30 Uhr	16:30 Uhr	Gesamter Versuchszeitraum	Ø (Tag)
„GwH13“	60	205	364	250	11,9
„GwH14“	108	157	211	144	6,8
„GwH14, nachts“	20	102	54	36,4	1,7
„GwH14, 24h“	128	169	240	136	6,5

* Zeitraum, in dem die Sonneneinstrahlung mindestens 120 W/m^2 beträgt; Wetterstation: Berlin Dahlem (WETTERKONTOR, 2018)

Deutliche Unterschiede zwischen den Versuchsreihen zeigten auch die tageszeitenabhängigen, durchschnittlichen Lichtmengen, die außerhalb des Gewächshauses aufgezeichnet wurden (Abbildung 4.9). Während die Bestrahlungsdauer in der Versuchsreihe „GwH14“ am längsten war, war die durchschnittliche Tageslichtsumme in der Versuchsreihe „GwH13“ am höchsten. Die Unterschiede zwischen den Versuchsreihen „GwH14“ und „GwH14, 24 h“ waren gering, die Versuchsreihe „GwH14, nachts“ unterschied sich hingegen deutlich. Die Bestrahlungsdauer von 6:00-17:00 Uhr war am kürzesten, die durchschnittliche Lichtmenge betrug im Vergleich zu den anderen Versuchsreihen weniger als die Hälfte.

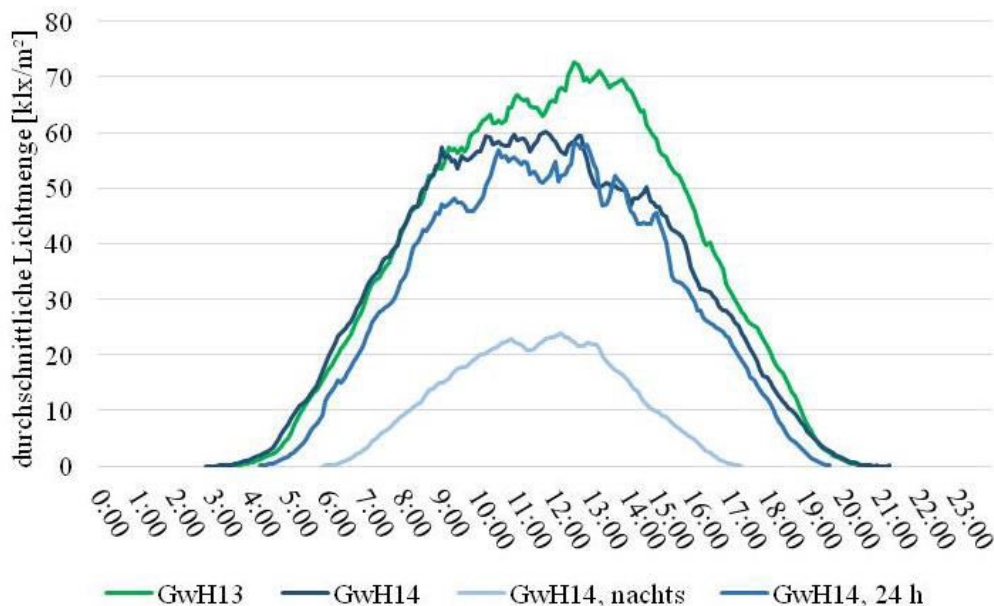


Abbildung 4.9: Durchschnittliche Lichtmenge [klx/m^2] im Tagesverlauf während der Versuchsdurchführungen im Gewächshaus (1 klx entspricht etwa $18,5 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ PAR-Wert; Quelle: MEYER, 1996)

Abbildung 4.10 zeigt die Tageslichtsummen über den gesamten Versuchszeitraum. Auffällig sind die durchweg sehr geringen Werte der Versuchsreihe „GwH14, nachts“. Die Tageslichtsummen der Versuchsreihe „GwH14, 24h“ waren hingegen relativ gleichmäßig auf einem mittleren Niveau. In der Versuchsreihe „GwH14“ gab es starke Schwankungen mit hohen Tageslichtsummen an den letzten sechs Versuchstagen. Die Tageslichtsummen der Versuchsreihe „GwH13“ schwankten zu Beginn stark, stabilisierten sich dann auf einem hohen Niveau.

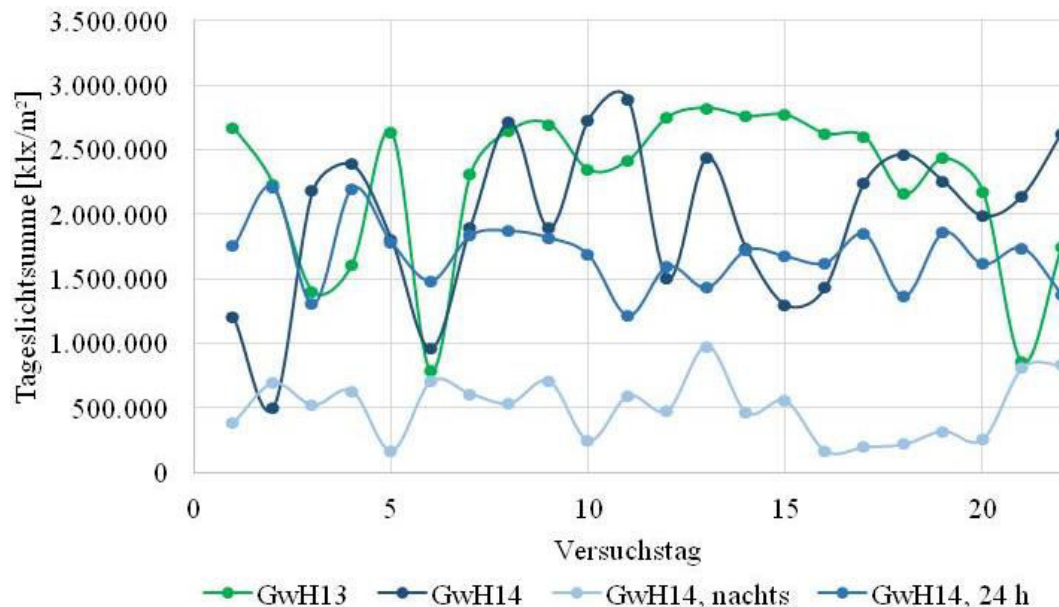


Abbildung 4.10: Tageslichtsummen [klx/ m²] an einzelnen Versuchstagen bei den Versuchsreihen „GwH13“, „GwH14“, „GwH14, nachts“ und „GwH14, 24h“ im Gewächshaus (1 klx entspricht etwa 18,5 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ PAR-Wert; Quelle: MEYER, 1996)

Neben dem Sonnenlicht wurde bei PAR-Werten $< 30 \text{ klx}$ (entspricht etwa $555 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$; berechnet nach MEYER, 1996) zwischen 8:00-10:00 Uhr und 17:00-22:00 Uhr künstliches Licht zugeschaltet. Verwendet wurden Natriumhochdrucklampen (SON-K400, 400W) mit einem PAR-Wert von ca. $87 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Auf Höhe der Versuchspflanzen wurden durch die Bestrahlung mit den Natriumhochdrucklampen zusätzlich zum Sonnenlicht $20\text{-}21 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ gemessen (Abbildung 4.11). Eine Ausnahme bildeten die Kontrollen der Versuchsreihe „GwH13“, die mit $34 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ etwas stärker als die anderen Pflanzen durch die Natriumhochdrucklampen bestrahlt wurden.

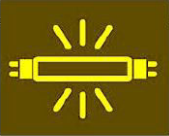
Kontrolle („GwH13“) HS- Lampe: $+34 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$	„HMG“-Variante HS- Lampe: $+20 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$	„PL“-Variante HS- Lampe: $+21 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$
		
Kontrolle („GwH14“, „GwH14, nachts“, „GwH14, 24 h“) HS- Lampe: $+21 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$	LED1 HS- Lampe: $+21 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$	LED2 HS- Lampe: $+20 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$
		LED3 HS- Lampe: $+20 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$

Abbildung 4.11: Verteilung der Varianten bei Gewächshausversuchen und die jeweilige PAR-Wert der Natriumhochdruck (HS)-lampe (SON-K400, 400W) auf Pflanzenhöhe; natürliche Sonnenstrahlung ist nicht in den Werten enthalten

Abbildung 4.12 zeigt das emittierte Lichtspektrum der Natriumhochdrucklampen, die insbesondere im längerwelligen Grünlichtbereich und Rotlichtbereich hohe Strahlungsstärken aufweisen. Damit verstärken die Natriumhochdrucklampen teilweise einen Bereich (langwelliges Grünlicht), welcher durch die verwendeten photoselktiven Folien absorbiert und somit verringert wird (Abbildung 4.19).

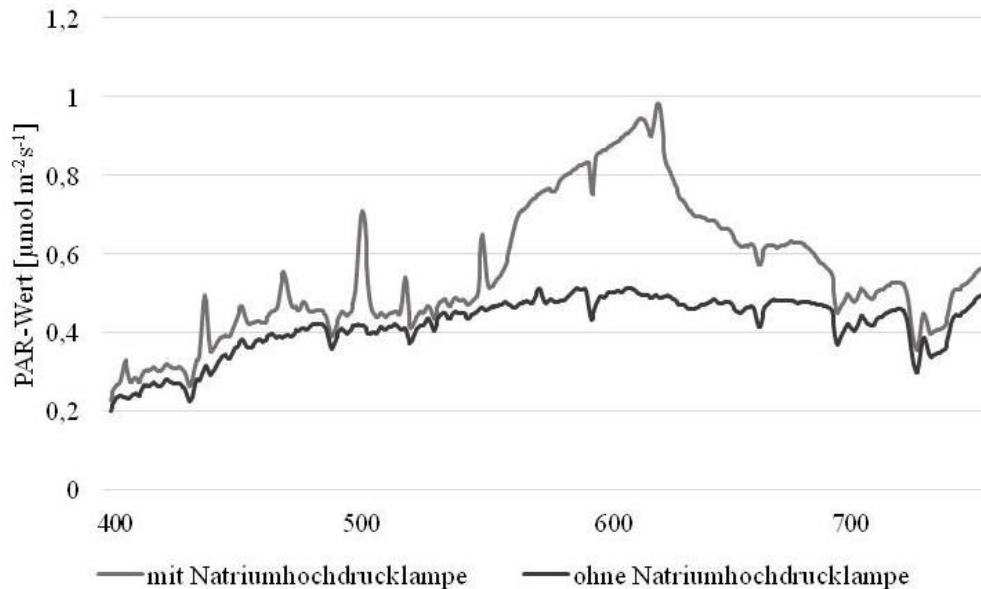
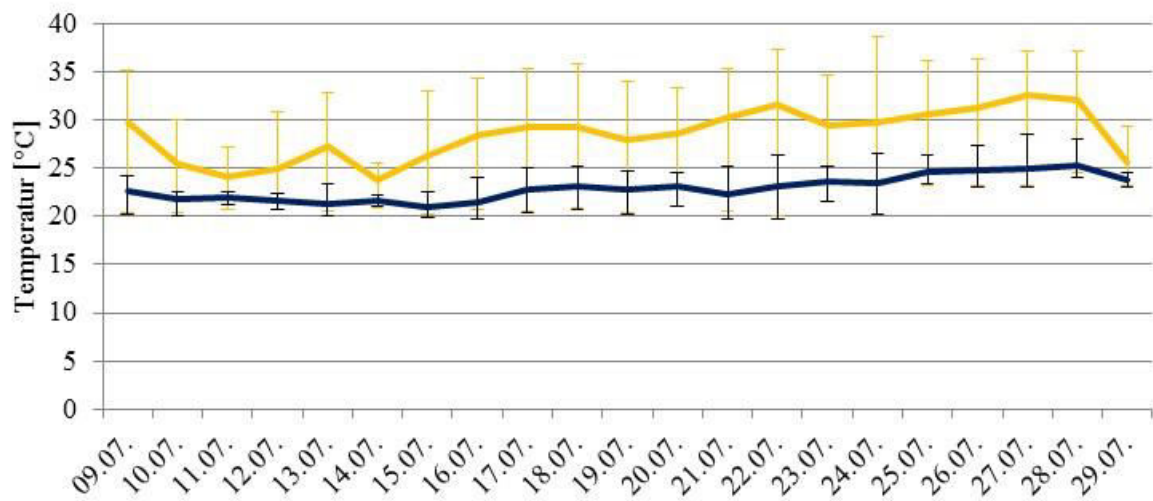


Abbildung 4.12: Lichtspektrum im Gewächshaus mit bzw. ohne zusätzliche Beleuchtung durch Natriumhochdrucklampen; gemessen wurde unterhalb der Natriumhochdrucklampen; gemessen am 20.08.2018 um 11:30 Uhr, Witterung: bewölkt; PAR-Wert ohne Zusatzbeleuchtung: $251 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, PAR-Wert mit Zusatzbeleuchtung: $338 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$; gemessen mit dem SpectraWiz Spectroradiometer PS-100

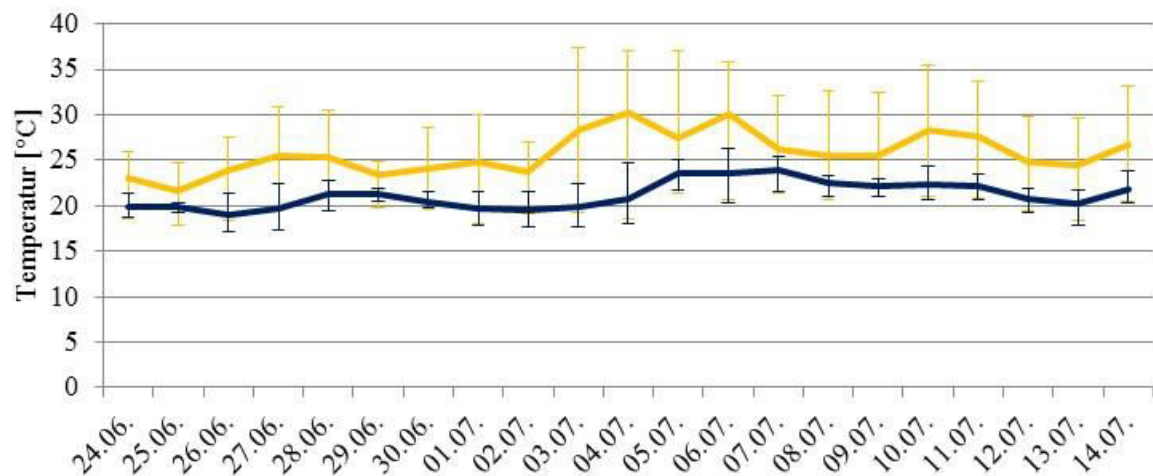
Bedingt durch den jeweiligen Versuchszeitraum kam es in den Versuchsreihen „GwH13“, „GwH14“ und „GwH14, 24h“ nur selten und lediglich in den Abendstunden zu einem Unterschreiten der vorgegebenen PAR-Werte, resultierend in einer Beleuchtung mit Natriumhochdrucklampen. Da die Versuchsreihe „GwH14, nachts“ erst im Oktober durchgeführt wurde, war eine Ergänzung des Sonnenlichts durch Natriumhochdrucklampen ab 18:15 Uhr erforderlich.

Verschiedene Komponenten lichtinduzierter Signalkaskaden wurden als Thermosensoren identifiziert (siehe Abschnitt 2.2.2), wodurch eine Beeinflussung der Untersuchungsparameter durch die Temperatur nicht ausgeschlossen werden kann. Bedingt durch die unterschiedlichen Witterungsverhältnisse und Versuchsmonate gab es verschiedene Temperaturverläufe während der Gewächshausversuche (Abbildung 4.13a-d):

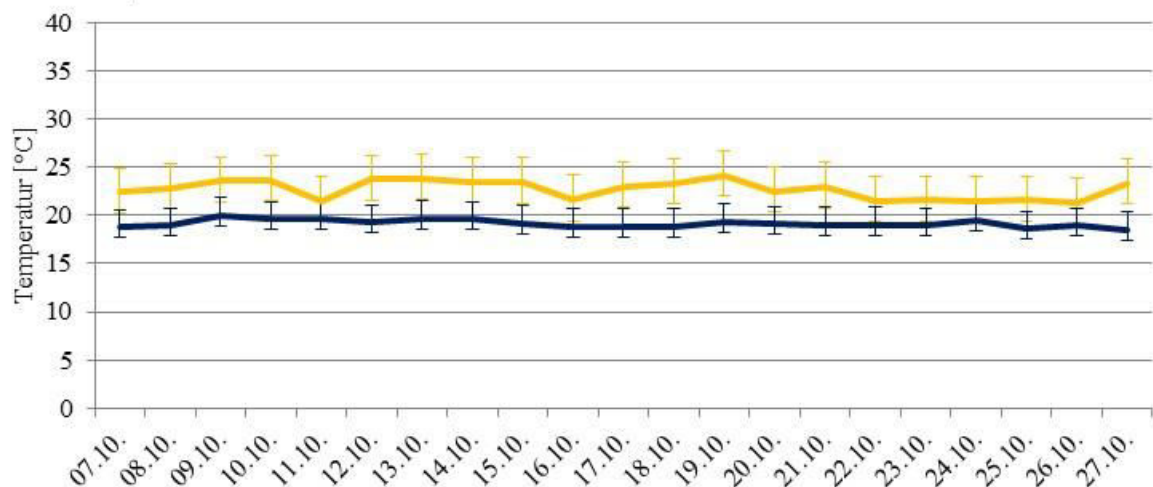
a. "GwH13"



b. "GwH14"



c. "GwH14, nachts"



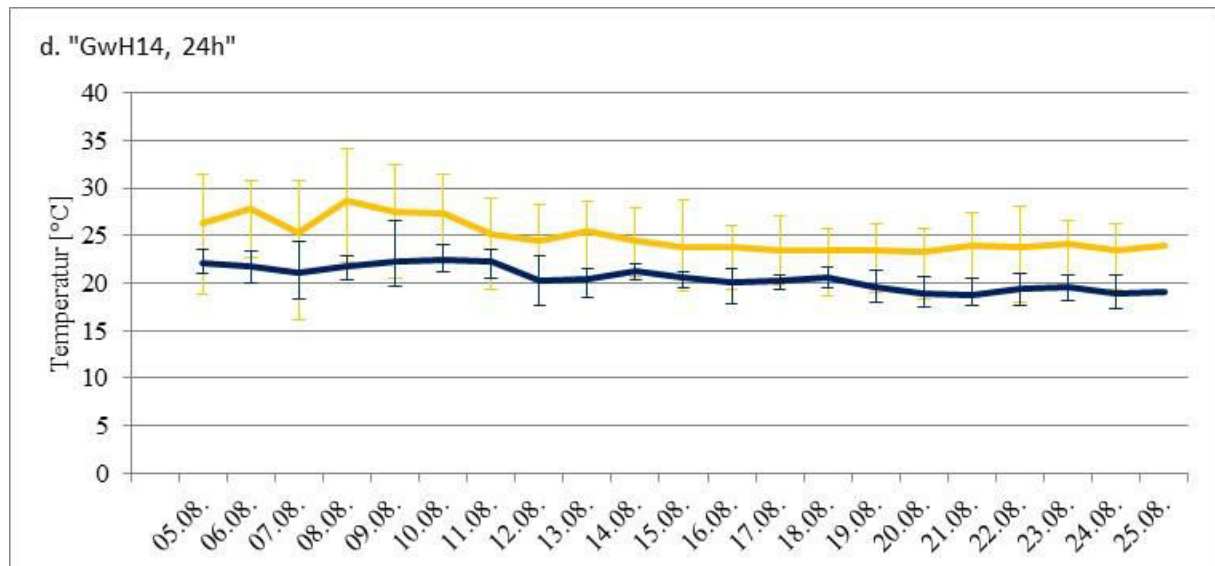


Abbildung 4.13 a-d: Temperaturverlauf während der Versuchszeiträume „GwH13“, „GwH14“, „GwH14, nachts“ und „GwH14, 24 h“ im Gewächshaus; die gelbe Linie zeigt die mittleren Tagestemperaturen mit jeweiligen Maximal- und Minimalwerten, die blaue Linie die mittleren Nachttemperaturen mit jeweiligen Maximal- und Minimalwerten

Aufgrund der Beeinflussung von Transpiration, Mineralstoffgehalten (GISLERÖD et al., 1987), Stomatenschließung und resultierender Photosyntheserate (EL-SHARKAWY et al., 1985) können auch Unterschiede der Luftfeuchtigkeit zwischen den Versuchsreihen der Interpretation der Ergebnisse dienen. Während die Werte nachts relativ ähnlich waren, unterschieden sich die Luftfeuchtigkeiten tagsüber mitunter deutlich (Tabelle 4.7). Verminderungen der Luftfeuchtigkeiten können auf Belüftungen zurückgeführt werden, wobei diese im Einzelfall nicht dokumentiert wurden.

Tabelle 4.7: Mittlere Luftfeuchtigkeiten bei Tag und Nacht während der Versuchsräume „GwH13“, „GwH14“, „GwH14, nachts“ und „GwH14, 24 h“ im Gewächshaus

	„GwH13“	„GwH14“	„GwH14, nachts“	„GwH14, 24 h“
Tag	49% ± 12	55% ± 12	74% ± 8	51% ± 13
Nacht	76% ± 6	79% ± 6	85% ± 6	76% ± 18

4.3.3 Versuche mit zusätzlicher LED-Beleuchtung

Eine zusätzliche Beleuchtung mit LEDs ermöglicht eine Modifizierung des Lichtspektrums in einem engen Bereich, ohne starke Veränderung der absoluten Strahlungsstärke der anderen Spektralbereiche. Verwendet wurden blaue LEDs (NL+B, FL+B) mit einer maximalen Strahlungsstärke bei 443 nm und rote LEDs mit einem Strahlungsmaximum bei 629 nm (NL+R, FL+R), deren Wellenlängen relevant für die Photosynthese und weitere pflanzenphysiologische Prozesse sind. Aufgrund widersprüchlicher Erkenntnisse über die Wirksamkeit grünen Lichtes wurden zudem grüne LEDs mit einem Maximum bei 515 nm (NL+G, FL+G) genutzt. Die Strahlungsstärken der verwendeten LEDs lagen bei $11 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (NL+B) bzw. $7 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (NL+G) bzw. $12 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (NL+R).

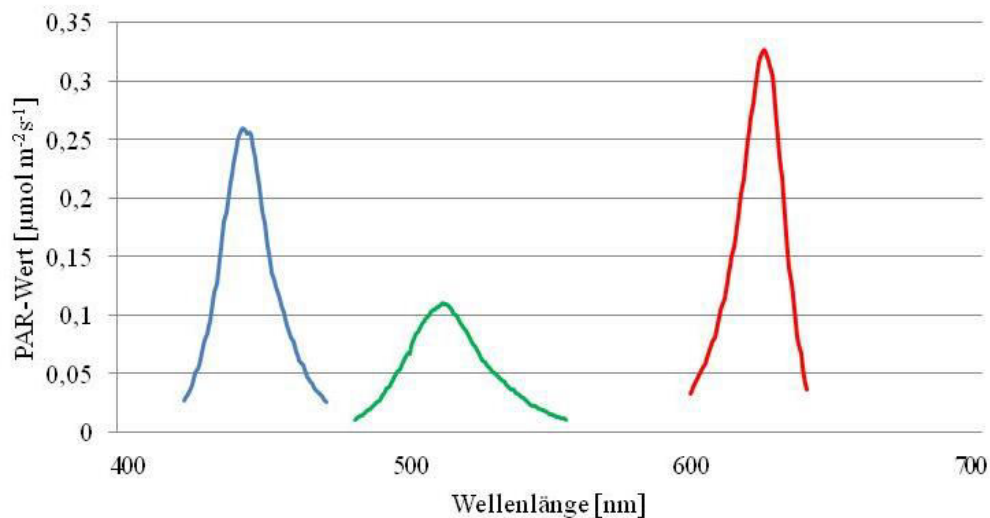


Abbildung 4.14: Wellenspektrum der verwendeten LED-Beleuchtung (gemessen mit dem AvantesAvaSpec NIR 256 Spektrometer)

Für die Gewährleistung einer gleichmäßigen Lichtverteilung, wurden pro Variante 4 LED-Leisten mit je 60 LEDs ($l=120$ cm) verwendet. In der Klimakammer befanden sich diese 80 cm über den Boden der Kammer bzw. 20 cm unterhalb der Leuchtstoffröhren.



Abbildung 4.15 a-c: Kultivierung von *P. odorata* in der Klimakammer mit zusätzlicher LED-Beleuchtung (rechts); Pflanzen vor (rechts oben) und nach (rechts unten) der Kultivierung in der Klimakammer. Die konstanten Lichtbedingungen in der Klimakammer ermöglichen eine Darstellung der Veränderung des Lichtspektrums durch die LEDs (Abbildung 4.16, Tabelle 4.8). Die Strahlungsmaxima der Leuchtstoffröhren bei 435 bzw. 545 bzw. 611 nm decken sich nicht mit den Strahlungsmaxima der LEDs. Hingegen wurden Wellenlängen verstärkt, die durch die Leuchtstoffröhren weniger stark abgedeckt wurden. Das blaue Licht wurde rechts vom Strahlungsmaximum der Leuchtstoffröhren verstärkt, d.h. im mittleren Bereich des Blaulichts. Die grünen LEDs bewirkten eine höhere Strahlungsstärke im kurzwelligen Grünlichtspektrum. Der rote Spektralbereich wurde durch kurzwelliges Rotlicht ergänzt. Keinen Einfluss hatten die LEDs auf den fernroten Spektralbereich.

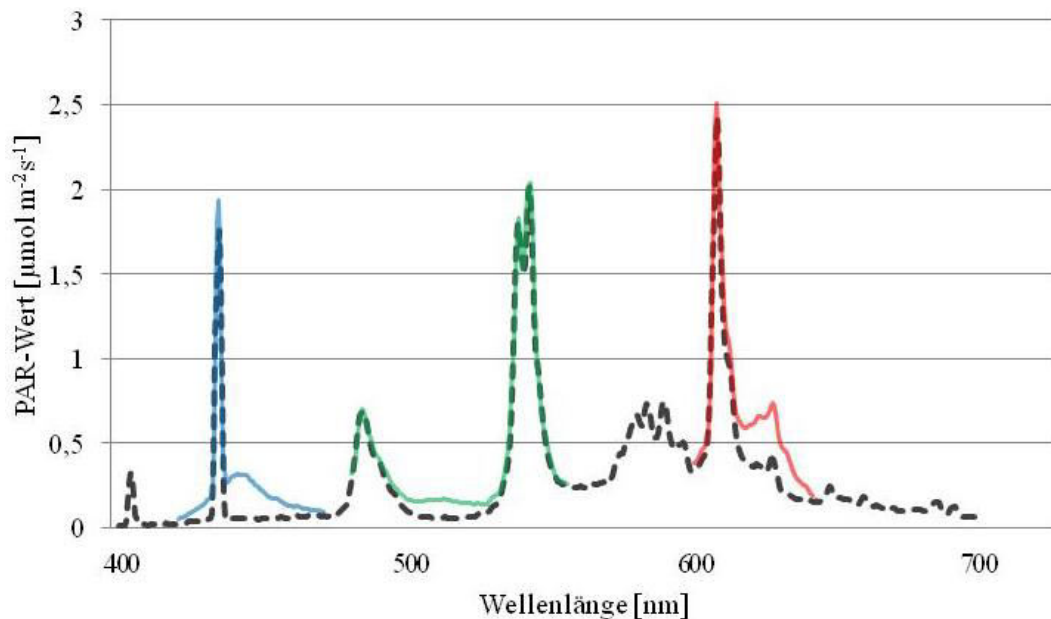


Abbildung 4.16: Vergleich des Lichtspektrums in der Klimakammer ohne LEDs (gestrichelte graue Linie) und mit zusätzlicher Bestrahlung durch LEDs (blau, grün und rot); dargestellt sind für die Varianten mit LEDs jeweils nur die veränderten Spektralbereiche; gemessen mit dem AvantesAvaSpec NIR 256 Spektrometer

Tabelle 4.8: Vergleich der spektralen Lichtzusammensetzung in der Klimakammer ohne und mit LEDs (blau, grün, rot); gemessen mit dem AvantesAvaSpec NIR 256 Spektrometer

Variante*	PAR-Wert [$\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$]	Anteile der einzelnen Spektralbereiche an der Gesamtbestrahlungsstärke [%]						Verhältnisse zwischen Spektralbereichen			
		401- 450	451- 500	501- 550	551- 600	601- 650	651- 700	B:R	BR:GB:G	R:G	R:FR **
FLb	81,17	7,8	10,6	22,7	23,9	27,7	6,8	0,53	1,14	0,40	0,74 4,01
FL+ B	87,96	15,3	13,0	20,1	21,1	24,4	6,1	0,92	1,58	0,80	0,78 4,01
FLg	113,1	7,8	10,6	22,8	23,9	27,7	6,8	0,53	1,14	0,40	0,74 4,01
FL+ G	109,35	7,4	11,0	26,1	22,7	26,2	6,6	0,56	1,12	0,43	0,69 4,01
FLr	157,31	7,8	10,6	22,8	23,9	27,7	6,8	0,53	1,14	0,40	0,74 4,01
FL+ R	149,50	7,3	9,9	21,2	22,2	32,8	6,5	0,44	1,45	0,49	0,96 4,01

** Verhältnis PAR-Wert bei 660 nm:730 nm

*FL+R= Ergänzung der Grundbelichtung durch rote LEDs (zugehörige Kontrolle: FLr), FL+G= Ergänzung der Grundbelichtung durch grüne LEDs (zugehörige Kontrolle: FLg), FL+B= Ergänzung der Grundbelichtung durch blaue LEDs (zugehörige Kontrolle: FLb)

Auch für die Versuche im Gewächshaus wurden vier LED-Leisten an höhenverstellbaren Holzrahmen (80 cm x 90 cm) angebracht (Abbildung 4.17).



Abbildung 4.17: Kultivierung von *P. odorata* im Gewächshaus mit zusätzlicher LED-Beleuchtung

Die Rahmen wurden über den Pflanzen platziert, wobei der Abstand zwischen LEDs und Pflanzen mit 10-15 cm konstant gehalten wurde. Aufgrund der ungleichen Lichtverteilung im Gewächshaus wurden

die Pflanzen wöchentlich rotiert. Die schwankenden Lichtintensitäten des natürlichen Lichts im Gewächshaus ließen keine allgemeine Aussage zu der Beeinflussung einzelner Spektralbereiche bzw. deren Verhältnisse durch die Zugabe von LEDs zu (Abbildung 4.18 a, b).

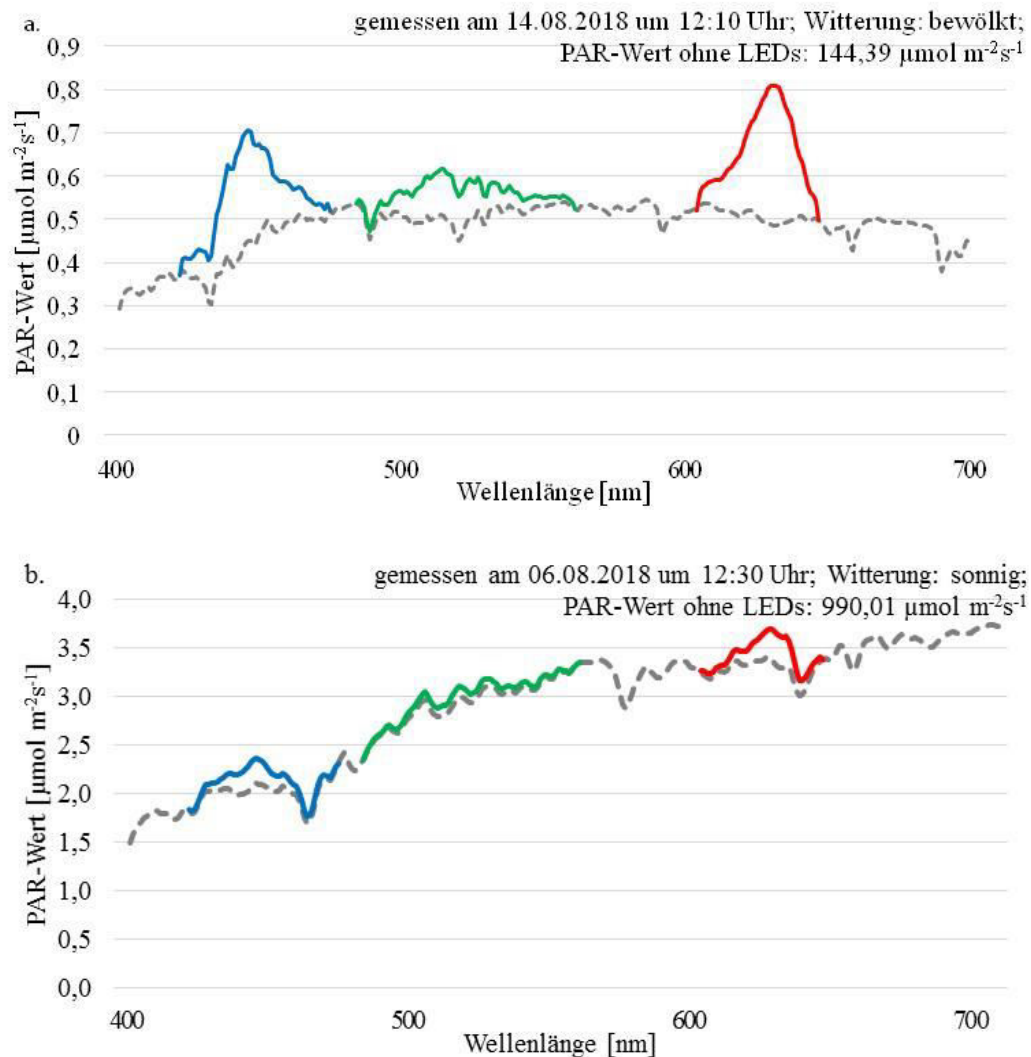


Abbildung 4.18 a,b: Veränderung des Lichtspektrums durch LEDs bei unterschiedlichen PAR-Werten des natürlichen Lichts (gestrichelte graue Linie), gemessen mit dem SpectraWiz Spectroradiometer PS-100

4.3.4 Lichtmodifizierung durch Überdeckung mit Folien

Im zweiten Teil der Versuche wurde das Lichtspektrum durch farbige, photoselektive Folien verändert. Verwendet wurden die Folien Half Minus Green 248 (HMG) und Pale Lavander 136 (PL) von der Firma LEE Filters (UK). Nach Angabe des Unternehmens handelt es sich um eine Polyesterfolie, überzogen mit einer dünnen Schicht farbigen Zelluloselacks. Der Lack enthält Farbstoffe, Flammschutzmittel und UV-Absorber, die vor einem Ausbleichen der Folien schützen.

Durch die Folie HMG wurde vor allem die Durchlässigkeit von grünem Licht eingeschränkt, während rotes Licht über den gesamten Spektralbereich (600-700 nm) fast vollständig transmittiert wurde. Im Vergleich zur HMG-Folie bewirkte die PL-Folie über das gesamte Lichtspektrum eine Verringerung

der Strahlungsstärke. Jedoch wurde verhältnismäßig ein größerer Anteil an blauem Licht durchgelassen und mehr grünes Licht absorbiert (Abbildung 4.19).

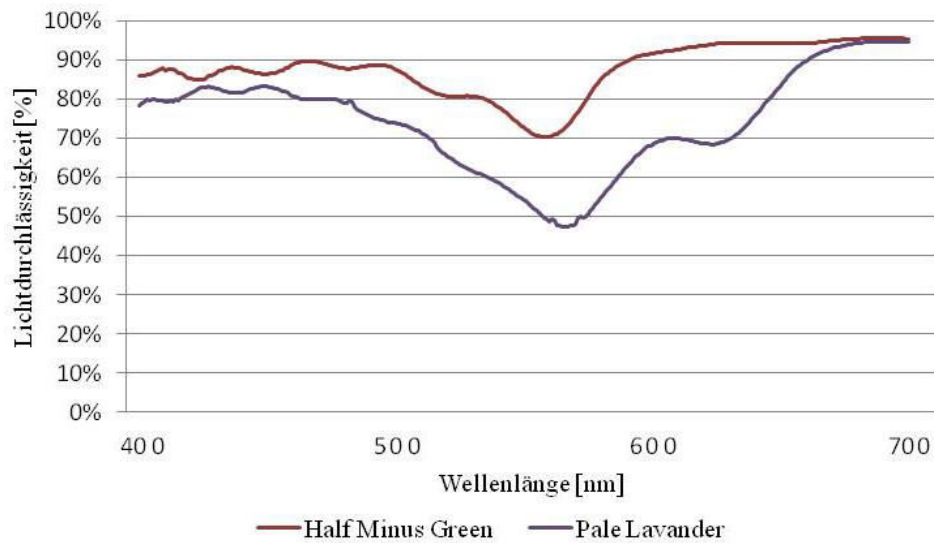


Abbildung 4.19: Lichtdurchlässigkeit der verwendeten Folien (rot: „HMG“, lila: „PL“); gemessen mit dem Unicam UV/VIS Spektrometer UV2



Abbildung 4.20: Kultivierung von *P. odorata* in der Klimakammer ohne und mit photoselktiven Folien („HMG“)

Durch Variationen des Abstandes der Pflanzen zu den Leuchtstoffröhren wurden in der Klimakammer die PAR-Werte angepasst, wodurch eine differenzierte Betrachtung des Einflusses von Lichtspektrum und Lichtintensität möglich war. Durch die HMG-Folie wurden Lichtdurchlässigkeiten von 72% und 55%, durch die PL-Folie 57% und 40% erreicht. Somit zeigte der Vergleich der Varianten „HMG55%“ und „PL57%“ Unterschiede bedingt durch abweichende Lichtspektren (Abbildung 4.21).

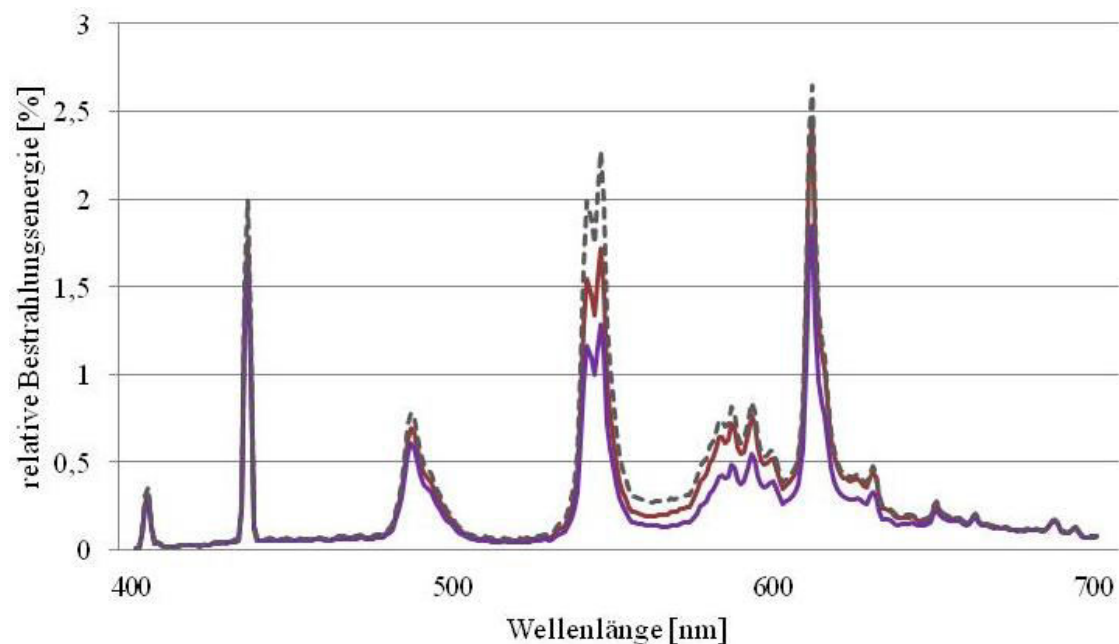


Abbildung 4.21: Lichtspektrum der Leuchtstoffröhren in der Klimakammer ohne und mit Folien; berechnet in Relation zur relativen Bestrahlungsenergie der Kontrolle (=FL ohne Folie), grau gestrichelt: Kontrollbeleuchtung (=FL), rot: Lichtmodifizierung durch HMG-Folie, lila: Lichtmodifizierung durch PL-Folie; gemessen mit dem AvantesAvaSpec NIR 256 Spektrometer

Resultierend auf den höheren Blau- und Rotlichtanteilen unter der PL-Folie waren die Verhältnisse B:R, BR:G, B:G und R:G höher als bei den HMG-Varianten. Die HMG-Folie bewirkte hingegen ein höheres R:FR-Verhältnis, welches vergleichbar war mit dem der Kontrollbedingungen.

Tabelle 4.9: Vergleich der spektralen Lichtzusammensetzung in der Klimakammer von Varianten ohne Folie mit den Varianten mit Folien (HMG=Half Minus Green 248, PL= Pale Lavander 136); gemessen mit dem AvantesAvaSpec NIR 256 Spektrometer

Variante*	PAR-Wert [$\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$]	Anteile der einzelnen Spektralbereiche an der Gesamtbestrahlungsstärke [%]						Verhältnisse zwischen Spektralbereiche				
		401-450	451-500	501-550	551-600	601-650	651-700	B:R	BR:G	B:G	R:G	R:FR**
FLh1	113,1	7,8	10,6	22,8	23,9	27,7	6,8	0,54	1,13	0,40	0,74	4,09
HMG72%	81,43	8,1	11,1	20,7	23,6	30,5	7,7	0,50	1,29	0,43	0,86	3,99
FLp1	81,17	7,8	10,6	22,8	23,9	27,7	6,8	0,54	1,13	0,40	0,74	4,09
PL57%	46,27	9,7	12,4	20,1	20,7	29,5	9,5	0,57	1,49	0,54	0,95	3,39
FLh2	190,06	7,8	10,6	22,8	23,9	27,7	6,8	0,54	1,13	0,40	0,74	4,09
HMG55%	104,53	8,1	11,1	20,7	23,6	30,5	7,7	0,50	1,29	0,43	0,86	3,99
PLp2	157,31	7,8	10,6	22,8	23,9	27,7	6,8	0,54	1,13	0,40	0,74	4,09
PL40%	62,92	9,7	12,4	20,1	20,7	29,5	9,5	0,57	1,49	0,54	0,95	3,39

* HMG55%= Überdeckung der Pflanzen mit der Half Minus Green-Folie, erreichte Lichtintensität: 55% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLh2), PL40%= Überdeckung der Pflanzen mit der Pale Lavander-Folie, erreichte Lichtintensität: 40% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLp2), HMG72%= Überdeckung der Pflanzen mit der Half Minus Green-Folie, erreichte Lichtintensität: 72% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLh1), PL57%= Überdeckung der Pflanzen mit der Pale Lavander-Folie, erreichte Lichtintensität: 57% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLp1)

** Verhältnis PAR-Wert bei 660 nm:730 nm

Im Gewächshaus wurden die Folien als Tunnel um die Pflanzen platziert, um einen Einfluss des nicht-modifizierten Lichts von den Seiten zu vermeiden. Gleichzeitig wurde durch die offenen Kopfenden eine Belüftung gewährleistet. Einer signifikanten Beeinflussung der Temperatur (Tabelle 4.10) und Luftfeuchtigkeit (Tabelle 4.10) durch die Folien wurde so entgegengewirkt.



Abbildung 4.22: Kultivierung von *P. odorata* im Gewächshaus mit Überdeckung durch photosensitive Folien (links: Half Minus Green-Folie, rechts: Pale Lavender-Folie)

Tabelle 4.10: gemessene Temperaturen und Luftfeuchtigkeiten auf Pflanzenhöhe ohne und mit Folien, gemessen zu drei Tageszeiten; gemessen mit dem Conrad Voltcraft HT-100 Thermo-/ Hygrometer

Tageszeit	Temperatur*			Luftfeuchtigkeit*		
	NL	NL+HMG	NL+PL	NL	NL+HMG	NL+PL
8:30 Uhr	26°C ±2	27°C ±2	27°C ±2	65% ±18	66% ±18	68% ±19
12:30 Uhr	33°C ±6	32°C ±6	32°C ±6	51% ±25	51% ±26	52% ±26
16:30 Uhr	34°C ±4	34°C ±4	34°C ±4	42% ±16	42% ±17	42% ±18

*angegeben sind Mittelwerte und Standardabweichungen (n=5 für 8:30 Uhr und n=4 für 12:30, 16:30 Uhr)

Durch das Breitbandspektrum des Sonnenlichtes (Abbildung 4.8) wurde der PAR-Wert nur um 22,1% (HMG) bzw. 46,1% (PL) reduziert.

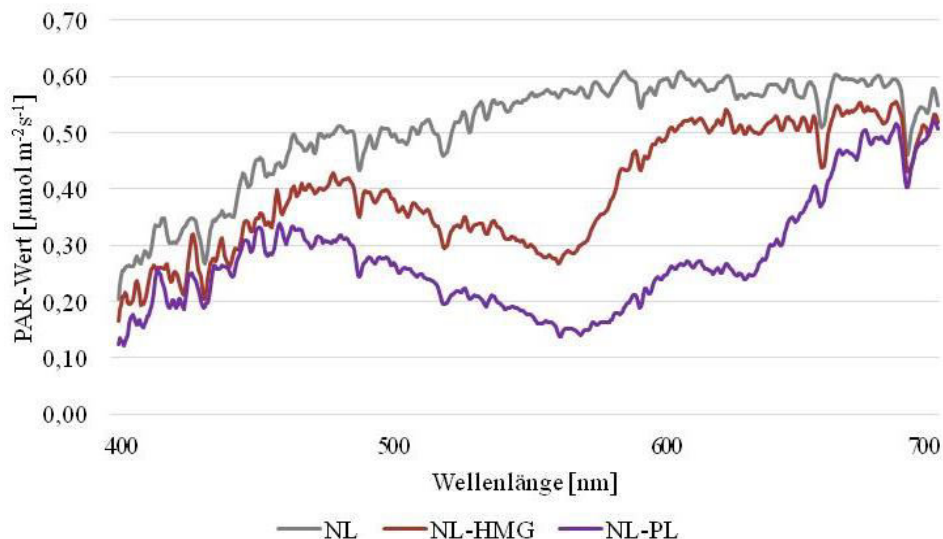


Abbildung 4.23: Lichtspektrum natürliches Licht im Gewächshaus (mit Schattierung) ohne und mit Folien; gemessen am 06.08.2018 um 12:30 Uhr mit dem SpectraWiz Spectroradiometer PS-100, Witterung: sonnig

Anders als in der Klimakammer war im Gewächshaus das B:R-Verhältnis der NL- und NL+PL-Varianten vergleichbar (Tabelle 4.11). Das R:FR-Verhältnis variierte hingegen zwischen allen Varianten.

Tabelle 4.11: Veränderung der spektralen Lichtzusammensetzung im Gewächshaus durch die Folien Half Minus Green 248 und Pale Lavander 136 im Vergleich zum natürlichen Licht im Gewächshaus ohne Folie (=100%); gemessen mit dem SpectraWiz Spectroradiometer PS-100

Variante*	Lichtdurchlässigkeit [%]	Anteile der einzelnen Spektralbereiche an der Gesamtbestrahlungsstärke [%]						Verhältnisse zwischen Spektralbereichen				
		401-450	451-500	501-550	551-600	601-650	651-700	B:R	BR:G	B:G	R:G	R:FR**
NL	100	10,8	15,6	17,1	18,9	19,0	18,8	0,70	1,78	0,73	1,05	1,16
NL+HMG	77,9	11,0	16,3	14,1	15,2	21,6	21,9	0,63	2,41	0,93	1,48	1,09
NL+PL	53,9	13,4	18,2	13,2	10,8	16,7	28,1	0,71	3,19	1,32	1,87	0,88

* NL= Natürliches Licht (Kontrollvariante), NL+HMG= Überdeckung der Pflanzen mit der Half Minus Green-Folie, NL+PL= Überdeckung der Pflanzen mit der Pale Lavander-Folie

**Verhältnis Bestrahlungsstärke bei 660 nm:730 nm

4.4 Methoden zur Ermittlung ausgewählter Inhaltsstoffe

Die Bestimmung organischer Inhaltsstoffe bezog sich auf die Gehalte in den Blättern als verzehrbare Pflanzenteile. Da es innerhalb einer Pflanze zu Variationen der Lichtbedingungen bedingt durch die Absorption einzelner Spektren durch höher gelegene Blätter kommt und auch das Blattalter einen Einfluss auf die Inhaltsstoffe haben kann (DREOSTI, 1996; NANTITANON et al., 2010; TSIMIDOU und PAPOTI, 2010), wurden stets Blätter vom zweiten oder dritten Blätterpaar unterhalb der Endknospe entnommen. Die Untersuchung von Mischproben half ebenfalls dabei, den Einfluss anderer Faktoren klein zu halten. Pro Variante und Bestimmung wurden 4 Mischproben untersucht, für die zwei Blätter je Gefäß verwendet wurden. Die Probenahme erfolgte immer zur selben Tageszeit (9:00 Uhr morgens) um tageszeit- und temperaturbedingte Schwankungen der Inhaltsstoffgehalte zu reduzieren. Eine Verfälschung der Ergebnisse durch feuchtigkeitsverlustbedingte Frischmasseverschiebungen wurde durch eine diffusionsdichte Aufbewahrung der Blätter verhindert.

4.4.1 Messung des Ascorbinsäuregehalts

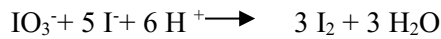
Ascorbinsäure als wasserlösliche Substanz wurde mit Wasser aus dem Pflanzenmaterial extrahiert. Eine bestimmte Menge an Pflanzenmaterial (0,1-0,2 g) wurde im Mörser mit Quarzsand fein zerkleinert und mit 10 ml destilliertem Wasser in zentrifugierbare Reagenzgläser überführt. Durch das Zentrifugieren (5 Minuten/ 3500 Umdrehungen pro Minute) wurden nicht gelöste Pflanzenbestandteile abgetrennt.

Der Ascorbinsäuregehalt wurde mit dem Iodtitrationsverfahren in Anlehnung an SUNTORNUSUK et al. (2002) quantifiziert, dessen Anwendbarkeit für die Ascorbinsäurebestimmung in Blättern durch andere Studien bestätigt wurde (ALUKO et al., 2012; DUMBRAVĂ et al., 2012; SPÍNOLA et al., 2013). Bei der Bestimmung werden die reduzierenden Fähigkeiten der Ascorbinsäure genutzt. Als leicht zu reduzierende Substanz wird Iodat (0,001 n) verwendet, als Indikator dient eine 1%ige Stärkelösung (Amylose). Um die Bildung von I₂ zu ermöglichen, werden zudem Iodid (10%) und Schwefelsäure (1 n) zugegeben.

Ascorbinsäure reduziert das Iod des Iodats (IO_3^-) und wird oxidiert.



Wenn die Ascorbinsäure vollständig oxidiert ist, wird kein Iodat reduziert. Dieses bildet mit Iodid und den Protonen der Säure I_2 :



Das entstandene I_2 lagert sich in die Amylose ein, woraus eine Blaufärbung resultiert. Bei konstant bleibender Blaufärbung liegt keine Ascorbinsäure mehr in ihrer reduzierten Form vor. Über die verbrauchte Kaliumiodatlösung kann dann der Ascorbinsäuregehalt der Probe berechnet werden:

$$\text{mmol AscH}_2 = n_{\text{KIO}_3^-} \cdot V_{\text{KIO}_3^-} \cdot 3 \cdot k$$

$$\text{mg AscH}_2 = n_{\text{KIO}_3^-} \cdot V_{\text{KIO}_3^-} \cdot 3 \cdot k \cdot m_{\text{AscH}_2}$$

4.4.2 Messung des Carotinoid- und Chlorophyllgehaltes

Die lipophilen Plastidenpigmente wurden mit Ethanol (96%) extrahiert und zentrifugiert (5 Minuten/ 3500 Umdrehungen pro Minute). Als Probe wurde eine Fläche von 5,088 cm² verwendet, deren Gewicht für spätere Berechnungen notiert wurde. Die Bestimmung der photosynthetisch aktiven Pigmente Chlorophyll a und b sowie der Carotinoide erfolgte unter Nutzung deren lichtabsorbierender Eigenschaften. Unter Zuhilfenahme spezifischer Absorptionsmaxima bei 470, 648 und 664 nm wurden die Gehalte spektrophotometrisch nach LICHTENTHALER und BUSCHMANN (2001) bestimmt.

Berechnung der Chlorophyllgehalte:

$$c_{\text{Chl a}} [\text{mg/l}] = 13,36 \cdot E_{664} - 5,19 \cdot E_{648}$$

$$c_{\text{Chl b}} [\text{mg/l}] = 27,43 \cdot E_{648} - 8,12 \cdot E_{664}$$

Berechnung Carotinoidgehalt:

$$c_{\text{Carotinoide}} [\text{mg/l}] = (1000 \cdot E_{470} - 2,13 \cdot c_{\text{Chl a}} - 97,64 \cdot c_{\text{Chl b}}) / 209$$

4.4.3 Messung der polyphenolische Inhaltsstoffe

Bestimmung des Gesamtpolyphenolgehalts

Polyphenolische Inhaltsstoffe wurden mit Methanol (80%) aus 0,1-0,2 g Pflanzenmaterial extrahiert. Um einen verbesserten Zellaufschluss zu ermöglichen, wurde der Extraktionslösung Salzsäure zugegeben, bis eine Konzentration von 5% erreicht wurde. Anschließend wurde das Probe-Lösungsmittelgemisch 24 Stunden lang gerüttelt und zentrifugiert.

Die Bestimmung des Gesamtpolyphenolgehalts erfolgte colorimetrisch mit der Folin-Ciocalteu-Methode in Anlehnung an ZHENG und WANG (2001). Im alkalischen Milieu reagieren das Wolframat und Molybdat aus dem Folin-Ciocalteu-Reagenz mit den Phenolen zu einem blauen Farbkomplex, welcher bei 760 nm spektrophotometrisch gemessen werden kann. Die Auswertung erfolgte anhand einer Kalibriergerade unter Verwendung eines Gallussäurestandards. Der Gesamtpolyphenolgehalt ist entsprechend in Gallussäureäquivalenten (GAE) angegeben.

Bestimmung des Flavonoidgehalts

Die Extraktion der Flavonoide aus 0,1-0,2 g grob zerkleinertem Pflanzenmaterial erfolgte mit Methanol (80%). Das Probe-Lösungsmittelgemisch wurde ebenfalls 24 Stunden lang gerüttelt und anschließend zentrifugiert. Der Gesamtflavonoidgehalt wurde spektrophotometrisch bestimmt in Anlehnung an BAHORUN et al. (2004). Flavonoide bilden mit Aluminiumchlorid gelbgefärbte Chelate, welche ihr Absorptionsmaximum bei 367 nm haben. Ausgewertet wurden die Ergebnisse anhand einer Kalibriergerade mit Quercetin als Standard.

Bestimmung des Anthocyangehalts

Die Anthocyane wurden aus dem gleichen Extrakt wie die Polyphenole bestimmt (extrahiert mit 80% Methanol und 5% HCl). Die Quantifizierung des Anthocyangehalts beruhte auf der *pH-Differential Method* nach GIUSTI und WROLSTAD (2001). Die Methode basiert auf reversiblen Änderungen der Anthocyanstruktur in Abhängigkeit vom pH-Wert, welche zu Unterschieden in der Absorption führen. Die Differenz der Absorptionen bei 520 nm ist proportional zu der Anthocyankonzentration. Der Pigmentgehalt wird mit Hilfe des Molekulargewichts und Extinktionskoeffizienten eines Anthocyanäquivalenten berechnet.

Für die Einstellung des pH 1,0 wurde ein Kaliumchloridpuffer verwendet, für pH 4,5 ein Natriumacetatpuffer. Die Anthocyankonzentrationen wurden mit Cyanidin-3-Glucosid als Anthocyanäquivalent über folgende Formel berechnet:

$$\text{Anthocyane [mg/l]} = \frac{((E_{520} - E_{720})_{pH1,0} - (E_{520} - E_{720})_{pH4,5}) * 1000 * VF * MW}{\epsilon * 1}$$

(VF = Verdünnungsfaktor, MW = Molekulargewicht des Anthocyanäquivalent, ϵ = molarer Extinktionskoeffizient des Anthocyanäquivalentes, 1000 = Faktor für die Umrechnung von g in mg)

Bestimmung Antioxidative Kapazität

Die angegebene antioxidative Kapazität bezieht sich auf den Extrakt, der für die Bestimmung der Polyphenole und Anthocyane verwendet wurde (extrahiert mit 80% Methanol und 5% HCl). Bestimmt wurde die antioxidative Kapazität mit der ABTS-Methode in Anlehnung an BAHORUN et al. (2004). Das ABTS-Radikal bildet in oxidativer Umgebung ein stabiles blau gefärbtes Radikalkation mit einer maximalen Extinktion bei 734 nm. Das Radikal wird durch die Antioxidantien im Probenextrakt reduziert und verliert dadurch seine Färbung. Die Extinktionsabnahme beschreibt dadurch die antioxidative Kapazität der Lösung. Die Auswertung erfolgte über eine Kalibriergerade mit Trolox als Standard.

4.4.4 Bestimmung anorganischer Inhaltsstoffe

Die Bestimmung anorganischer Inhaltsstoffe erfolgte aus dem getrockneten Pflanzenmaterial, welches im Trockenschrank bei 60°C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet wurde. Die Mineralstoffe Kalium, Calcium, Eisen, Magnesium und Phosphor wurden per Mikrowellenaufschluss mit dem Mikrowellen-Laborsystem Mars Xpress der CEM GmbH unter Verwendung von Salpetersäure und Wasserstoffperoxid aus den Pflanzenproben gelöst. Dafür wurden 0,5 g des getrockneten Pflanzenmaterials eingewogen und mit 5 ml 5%iger Salpetersäure und 3 ml 30%igem Wasserstoffperoxid versetzt. Das Zeit-/Temperaturprogramm des Mikrowellenaufschlusses war: 20 Minuten bei 200°C, eine Minute bei 210°C und zum Schluss eine Minute bei 220°C. Nach einer Abkühlzeit von 30 Minuten wurden die Proben gefiltert.

Unter Verwendung der Multielementanalyse ICP-OES („inductively coupled plasma optical emission spectrometry“) fand anschließend die Quantifizierung statt. Das Verfahren basiert darauf, dass Atome der einzelnen Elemente in ihrem angeregten Zustand spezifische Emissionsspektren aufweisen (NÖLTE, 2001).

Für die Nitratbestimmung wurden 2,5 g des getrockneten Pflanzenmaterials in ca. 250 ml destilliertem Wasser unter Schütteln (15 Minuten) gelöst. Nach einer Filtration erfolgte die Gehaltsbestimmung mit dem RGflex der Fa. Merck. Die quantitative Schnellmethode beruht darauf, dass enthaltenes Nitrat in der Probe durch ein Reduktionsmittel zu Nitrit reduziert wird, welches in einem sauren Milieu mit einem aromatischen Amin ein Diazoniumsalz bildet. Das Diazoniumsalz reagiert mit N-(1-Naphthyl)-ethylendiamin zu einem rotvioletten Azofarbstoff. Dafür wurde ein Teststäbchen in das Filtrat getaucht und nach Ablauf einer Reaktionszeit von 60 Sekunden in den Reflektometer eingelegt. Die Bestimmung der Konzentration des Azofarbstoffes erfolgte reflektometrisch (SCHMIDHALTER, 2005). Der Gehalt wird in mg Nitrat/ l angegeben.

4.5 Weitere Bestimmungen

Neben der Bestimmung wertgebender organischer und anorganischer Inhaltsstoffe in den Blättern von *P. odorata* wurden im Gewächshaus täglich, in der Klimakammer vor jeder Versuchsreihe die Lichtintensitäten dokumentiert. Als Parameter für das Pflanzenwachstum wurden wöchentlich das Triebwachstum und bei Versuchsende die Biomassebildung als Frisch- und Blattmasse, sowie der Trockenmassegehalt (%) gemessen. Über Frisch- und Blattmasse wurde das Blatt:Frischmasse-Verhältnis berechnet, mit der Blattmasse und dem Trockenmassegehalt die Trockenmasse pro Pflanze.

4.5.1 Lichtmessungen

Regelmäßige Messungen der PAR-Werte wurden mit dem transportierbaren Chlorophyll Fluorimeter PAM-2000 (Walz, Deutschland) durchgeführt. In der Klimakammer wurde der PAR-Wert auf Pflanzenhöhe (20 cm oberhalb des Kammerbodens) gemessen. Um die Lichtbedingungen in der gesamten Kammer abbilden zu können, gab es 13 Messpunkte:

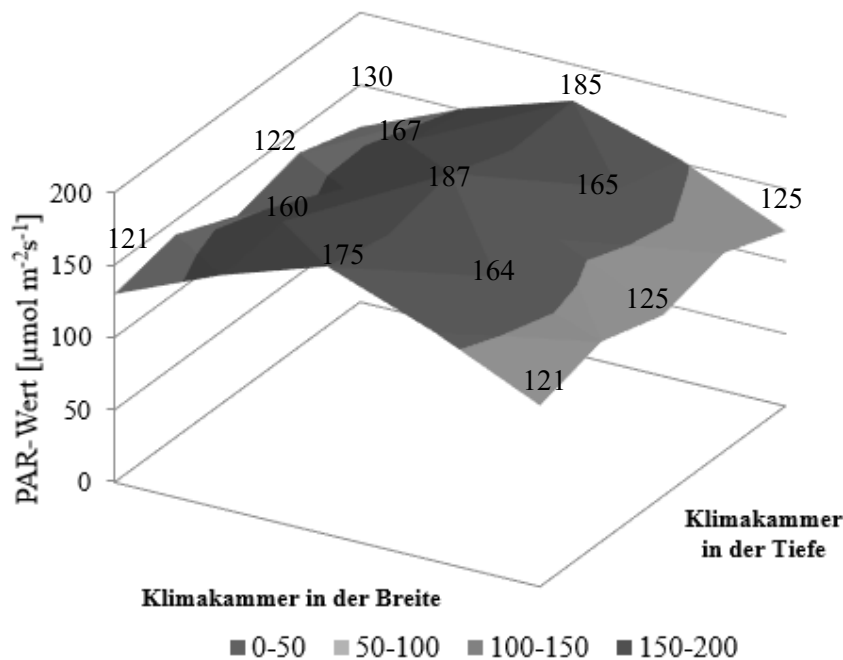


Abbildung 4.24: graphisch dargestellte Lichtverteilung in der Klimakammer, Messung der PAR-Werte ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$), emittiert von den Leuchtstoffröhren (=Kontrollbeleuchtung) auf Pflanzenhöhe (20 cm über Boden) und an 13 Messpunkten; gemessen mit: Chlorophyll Fluorimeter PAM-2000 (Walz, Deutschland)

Im Gewächshaus wurde das PAR-Licht 5 cm unterhalb der LED-Leisten gemessen. Jede Messung beinhaltet 6 Messpunkte, oberhalb jedes Gefäßes. Die Messungen wurden zu drei Tageszeiten durchgeführt: 8:30 Uhr, 12:30 Uhr und 16:30 Uhr (Tabelle 4.6).

Die Lichtspektren der Leuchtstoffröhren und LEDs wurden mit dem AvantesAvaSpec NIR 256 Spektrometer gemessen. Jede Messung stellt einen Mittelwert aus 500 Scans dar, die jeweils in einem Abstand von 2 mS aufgenommen wurden.

Die spektrale Lichtzusammensetzung des natürlichen Lichts im Gewächshaus und Freiland, der Natriumhochdrucklampen sowie Fluoreszenzlampen im Innenraum wurde mit dem SpectraWiz Spectroradiometer PS-100 gemessen. Vor jeder Messung musste die Integrationszeit an die Lichtzusammensetzung und –intensität angepasst werden. Für Messungen des Sonnenlichts im Freiland wurde beispielsweise eine Integrationszeit von 20 ms gewählt, bei Bewölkung 200 ms. Durch die geringen Lichtintensitäten im Innenraum wurde die Messung der Fluoreszenzlampe mit 300 ms durchgeführt. Mit Hilfe der Daten des AvantesAvaSpec NIR 256 Spektrometers und des SpectraWiz Spectroradiometer PS-100 wurden Graphen erzeugt, die die spektrale Lichtzusammensetzung der jeweiligen Bedingungen darstellen. Die

Y-Achse zeigt den PPFD der einzelnen Wellenlängen. Durch eine Integration der PPFD-Werte im Bereich 400-700 nm wurde der PAR-Wert berechnet.

Die Transparenz der Folien wurde mit Hilfe des Spektrophotometers Unicam UV/VIS Spektrometer UV2 bestimmt.

4.5.2 Chlorophyllfluoreszenz

Das variable Chlorophyllfluoreszenzverhältnis F_v/F_m kann auf mögliche destruktive Effekte durch die angewandten Lichtbedingungen beim photosynthetischen Elektronentransport um das Photosystem II hinweisen (SIMKIN et al., 2003). F_m beschreibt die maximale Fluoreszenzausbeute, wenn die dunkel angepasste Probe einem intensiven, gesättigten Lichtimpuls ausgesetzt wird. Die vorübergehend reduzierten PSII Elektronenakzeptoren verhindern die PSII Photochemie. F_v beschreibt die variable Fluoreszenz als Differenz zwischen F_m und F_o (Ursprungsfluoreszenz, bei vollständiger Oxidation aller PSII Reaktionszentren und Elektron-Akzeptor-Moleküle) (BOLHAR-NORDENKAMPF et al., 1989). Das F_v/F_m -Verhältnis ist proportional zur Sauerstoffentwicklungsrate und gibt die Höhe der photochemischen Nutzung der absorbierten Lichtenergie an (GENTY et al., 1989). Eine Reduktion der photosynthetischen Ausbeute kann durch verschiedene Stressbedingungen verursacht werden. Dies äußert sich in einer verringerten Nutzung der absorbierten Energie für photochemische Prozesse, welche im theoretisch optimalen Zustand bei etwa 80% liegt (SCHÄFER und SCHMID, 1993; SCHOPFER und BRENNICKE, 2010). Die restliche Energie wird als Wärme (19,5%) oder Fluoreszenzlicht (0,5%) abgestrahlt. Der Anteil an Fluoreszenzlicht wird u. a. durch Luftschadstoffe (BOLHAR-NORDENKAMPF et al., 1989), Salzstress, Kälte (PERCIVAL und FRASER, 2001) und bestimmte Lichtbedingungen (GENTY et al., 1989) erhöht, wodurch die Messung der Chlorophyllfluoreszenz auf stressbedingte Störungen der Photosynthese hinweisen kann.

Chlorophyllfluoreszenzmessungen wurden in den Versuchsreihen „KK13“ und „GwH13“ durchgeführt. Die Messungen der Chlorophyllfluoreszenz erfolgte nach Vorverdunklung an fünf Messpunkten auf zwei Blättern je Gefäß. In Anlehnung an BOLHAR-NORDENKAMPF et al. (1989) wurden als Vorverdunklungszeit 30 Minuten angesetzt. Für die Messung verwendet wurde das transportierbare Chlorophyll Fluorimeter PAM-2000 (Walz, Deutschland). Dabei wird durch ein nicht-aktinisches Meßlicht die Ursprungsfluoreszenz F_o der dunkeladaptierten Blätter bestimmt. Ein saturierender Lichtimpuls löst die maximale Fluoreszenz aus.

4.5.3 Messungen Temperatur und Luftfeuchtigkeit

Neben der automatischen Messung von Temperatur und Luftfeuchtigkeit im Gewächshaus, die alle fünf Minuten erfolgte, wurden die Parameter auch manuell auf Pflanzenhöhe bestimmt. Verwendet wurde das Conrad Voltcraft HT-100 Thermo-/ Hygrometer. Von Relevanz waren diese Werte für die Beurtei-

lung der Bedingungen unter den photoselektiven Folien (Tabelle 4.10). Auf diese Weise konnte ausgeschlossen werden, dass die Folien neben dem Licht auch Temperatur oder Luftfeuchtigkeit beeinflussen.

4.5.4 Parameter zur Charakterisierung des Wachstums

Pflanzenwachstum

Da *P. odorata* eine buschig wachsende Pflanze ist, wurde das Pflanzenwachstum über die Länge der Haupttriebe anstatt der Höhe des Habitus bestimmt. Pro Gefäß wurden vier Haupttriebe ausgewählt und markiert. So konnte gewährleistet werden, dass wöchentlich die gleichen Triebe gemessen wurden.

Frisch- und Blattmasse

Frisch- und Blattmasse wurden nach Versuchsende bestimmt. Dabei gingen nur oberirdische Pflanzenteile in die Messung mit ein. Während die Frischmasse die gesamte oberirdische Pflanze abdeckte, wurden bei der Bestimmung der Blattmasse nur Blätter und weiche Triebe gewogen. Frisch- und Blattmasse wurden aus Gründen der Durchführbarkeit pro Gefäß bestimmt und auf die Anzahl der Pflanzen heruntergerechnet.

Trockenmassegehalt (%)

Getrocknet wurden je Gefäß etwa 100 g Pflanzenmaterial. In Anlehnung an GROSS et al. (2007) fand die Trocknung im Trockenschrank bei 60°C bis zur Gewichtskonstanz statt, welche nach etwa 4 Tagen erreicht war. Über die eingewogene Menge wurde der Trockenmassegehalt (%) bestimmt.

Für die Untersuchungen der anorganischen Inhaltsstoffe wurde das Material anschließend auf eine Partikelgröße von 1 mm gemahlen.

4.6 Ergebnisdarstellung und Statistik

Mit Microsoft Office wurden die Daten erfasst und die deskriptive Statistik durchgeführt. Um den Verlauf des Triebwachstums über den Versuchszeitraum darzustellen, wurden gestapelte Balkendiagramme verwendet. Die statistische Auswertung bezieht sich auf das gesamte Wachstum nach drei Wochen.

Für weitere graphische Darstellungen wurden folgende Programme genutzt:

- Strukturformeln: 2D-Strukturformelzeichner ChemDoodle
- Diagramme: Dia, Draw.io
- Hauptkomponentenanalyse: SAS

Bei der statistischen Auswertung wurden verschiedene Verfahren genutzt, die in der Gesamtheit eine Aussage ermöglichen sollen, inwieweit welche Faktoren isoliert oder in Kombination die Untersuchungsparameter beeinflussten.

- Einfaktorielle Varianzanalyse (SAS)

Nach Feststellung der Normalverteilung mittels Shapiro Wilk Test wurden die metrischen Daten auf signifikante Unterschiede überprüft. Verwendet wurde die einfaktorielle Varianzanalyse, mit den verschiedenen Lichtbedingungen als Einflussvariable/ Faktor (z.B. NL, NL+B, NL+G, NL+R). Die Signifikanz wurde durch den Tukey-Test festgestellt ($p < 0,05$) und mit einer entsprechenden Buchstabenvergabe gekennzeichnet. Da bei den Versuchsreihen im Gewächshaus eine parallele Kultivierung aller Varianten möglich war, konnten in der Varianzanalyse entsprechend alle Varianten auf signifikante Unterschiede untereinander überprüft werden. In der Klimakammer war dies nicht möglich, sodass jeweils die LED- oder Folienvariante auf signifikante Unterschiede im Vergleich mit der zugehörigen Kontrolle untersucht wurde.

- Partielle Korrelationen (SAS)

Um Inhaltsstoffe bzw. Pflanzenmerkmale untereinander und mit einzelnen Lichteigenschaften in Beziehung setzen zu können, wurden mit SAS Korrelationen berechnet. Differenziert werden musste dazu zwischen Versuchsreihen, bei denen sich die Lichteigenschaften intervallskaliert oder ordinalskaliert beschreiben ließen. Bei den Klimakammerversuchen sowie den Folienversuchen im Gewächshaus waren die Eigenschaften intervallskaliert, sodass der Pearson'sche Korrelationskoeffizient verwendet werden konnte. Nach erfolgreicher Feststellung der Normalverteilung mittels Shapiro Wilk Test wurden Pearson'sche Korrelationskoeffizienten ($p < 0,05$) bestimmt. Um Scheinkorrelationen aufgrund von Wechselwirkungen zwischen Lichtintensität und Lichtspektralen zu vermeiden, wurden Pearson'sche Partialkorrelationskoeffizienten berechnet. Dafür wurde zur Berechnung der Korrelationen zwischen der spektralen Lichtzusammensetzung (prozentuale Anteile der einzelnen Spektralbereiche und Verhältnisse) und den Untersuchungsparametern der Einfluss der Lichtintensität herausgerechnet. Für Korrelationen der Lichtintensität und der Untersuchungsparameter wurde entsprechend der Einfluss durch andere Untersuchungsparameter herausgerechnet. Die Lichteigenschaften bei den LED-Versuchen im Gewächshaus ließen sich hingegen nur ordinalskaliert darstellen, folglich wurde die partielle Spearman'sche Rangkorrelation berechnet. Eine Normalverteilung der Daten ist für diese Methode nicht vorausgesetzt.

- Gemittelte Korrelationskoeffizienten

Aufgrund der Vielzahl an Versuchsreihen mit jeweils individuellen Lichtbedingungen und Einflussfaktoren wurden für eine zusammenfassende Aussage Mittelwerte der Korrelationen zwischen Lichteigenschaften und Untersuchungsparametern bestimmt. Aufgrund der schiefen Verteilung von Korrelations-

koeffizienten wurden diese zunächst in eine annähernd normalverteilte Größe mittels Fisher-Z-Transformation konvertiert. Die Fisher-Z-Werte konnten gemittelt und der Mittelwert rücktransformiert werden (CLAYTON und DUNLAP, 1987).

- Regressionsgerade mit Bestimmtheitsmaß (Excel)

Zur Veranschaulichung des Zusammenhanges zwischen PAR-Wert/ Tageslichtsumme und dem jeweiligen Untersuchungsparameter wurden Graphen erstellt. Die Regressionen beziehen sich auf die Kontrollen, sodass nur die Lichtintensität berücksichtigt wurde.

- Berechnung der Wirkung einer Erhöhung der Tageslichtsumme um 1% (durch spektralbereichsneutrale Erhöhung oder Supplementierung mit einem bestimmten Spektralbereich) (Excel)

Anhand der Regressionsgeraden wurden die Ertrags- und Inhaltsstoffsteigerungen berechnet, die sich bei einer Erhöhung der Tageslichtsumme um 1% ergeben. Da die verwendeten LEDs verschiedene Bestrahlungsstärken hatten, wurde die Wirkung einer 1%igen Erhöhung der Bestrahlungsstärke durch Supplementierung im blauen (443 nm), grünen (515 nm) und roten (629 nm) Spektralbereich berechnet. Dies ermöglicht einen Vergleich der Wirkung einer spektralbereichsneutralen mit spektralbereichsabhängigen Erhöhungen der Bestrahlungsstärke.

- Multiple Korrelationen (SAS)

Für eine Differenzierung der Beeinflussung wertgebender Inhaltsstoffe und des Pflanzenwachstums durch die verschiedenen Kultivierungsparameter im Gewächshaus (Tageslichtsumme, Tages-/ Nachttemperatur, Tages-/ Nachtluftfeuchtigkeit) wurden multiple Korrelationen berechnet. Durch das Statistikprogramm SAS wird das multiple Bestimmtheitsmaß $B=R^2$ ausgegeben, das den Zusammenhang zwischen abhängiger Variable und den ausgewählten Prädiktoren beschreibt. In Anlehnung an NICOLE et al. (2017) wurde für die organischen Inhaltsstoffe der Zeitraum von drei Tagen vor der Probenahme berücksichtigt. In die Berechnung der Beeinflussung der Wachstumsparameter durch die verschiedenen Kultivierungsparameter ging hingegen der gesamte Versuchszeitraum ein.

- Hauptkomponentenanalyse (SAS)

Für eine Strukturierung und Veranschaulichung der Daten wurden für die einzelnen Versuchsreihen Hauptkomponentenanalysen (PCA=principal component analysis) durchgeführt. Über die Berechnungen der Korrelationen werden ähnlich beeinflusste Parameter zu Clustern zusammengefasst und über ihre Eigenvektoren im Raum dargestellt (WOLD et al., 1987). Für den Zweck der Clusterbildung findet die Analyse in der Bioinformatik Verwendung (STASHENKO et al., 2010; STURN et al., 2002; YEUNG und RUZZO, 2001). Aufgrund der unterschiedlichen PAR-Werte der Leuchtstoffröhren in den Klimakammerversuchen wurden die Veränderungen des Pflanzenwachstums und der Inhaltsstoffgehalte durch die Lichtmodifikationen prozentual im Bezug auf die jeweilige Kontrolle berechnet. Dadurch konnte eine Vergleichbarkeit aller Klimakammerversuche gewährleistet und diese in einer Hauptkomponen-

tenanalyse gemeinsam dargestellt werden. Durch die Clusterbildung konnte gezeigt werden, welche Inhaltsstoffgehalte bzw. Pflanzenwachstumsparameter durch eine bestimmte Lichtmodifikation parallel verändert wurden. Ein Abgleichen mit den Ergebnissen der Varianzanalysen und partiellen Korrelationen ermöglicht eine Zuordnung der einzelnen Cluster zu den bestimmten Lichtbedingungen. Dadurch eignet sich die Analyse für einen graphischen Vergleich der Ergebnisse einzelner Versuchsreihen untereinander und einer Veranschaulichung des Einflusses bestimmter Lichtbedingungen auf den Nährwert und die Pflanzenentwicklung. Die Hauptkomponenten werden durch die Analyse nicht beschrieben und als „component 1“ und „component 2“ ausgegeben mit dem dazugehörigen Anteil an der Gesamtvarianz, der durch die Komponente erklärt wird.

Durch eine Kombination der statistischen Verfahren kann abgeschätzt werden, durch welche(n) Faktor (Bestrahlungsstärke, einzelne Spektralbereiche, Verhältnisse zwischen Spektralbereichen, Temperatur, Luftfeuchtigkeit) ein Untersuchungsparameter beeinflusst wurde (siehe Beispiel). Es können Unterschiede und Gemeinsamkeiten zwischen Versuchsreihen dargestellt werden mit dem Ziel, allgemeine Tendenzen zu formulieren.

Beispiel: Beeinflussung der Frischmasse durch LEDs in der Klimakammer

- (1) Die Varianzanalyse (siehe Tabelle 5.55) zeigte eine signifikante Erhöhung der Frischmasse durch eine zusätzliche Bestrahlung mit blauen LEDs
- (2) Die Regressionsgerade (Abbildung 4.25) bestätigt die positive Beeinflussung durch eine Erhöhung des Blaulichtes. Zugleich wird ein deutlich positiver Zusammenhang mit der Tageslichtsumme dargestellt. Ausgehend von der Trendlinie, die nur für die Kontrollen gilt, deutet sich zusätzlich eine positive Beeinflussung durch grüne und rote LEDs an

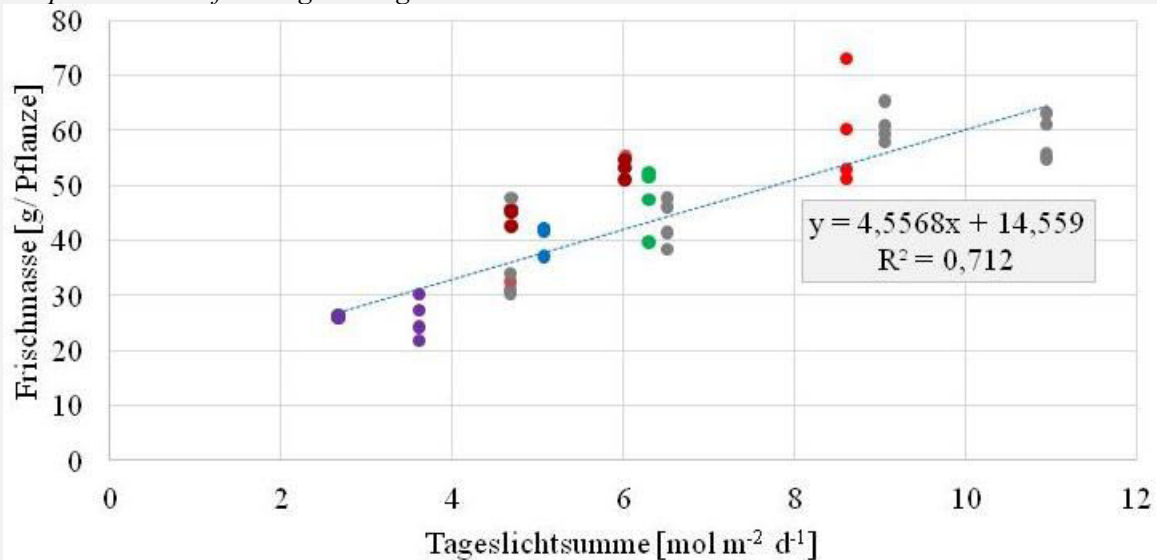


Abbildung 4.25: Zusammenhang zwischen Tageslichtsumme und Frischmasse [g/ Pflanze] in der Klimakammer; Unterschiede der Lichtzusammensetzung nicht berücksichtigt. grau: FL, blau: FL+B, grün: FL+G, rot: FL+R, lila: FL+PL, dunkelrot: FL+HMG; Regressionsgerade mit Regressionskoeffizienten (R^2) und Formel wurden für die Kontrollen berechnet

- (3) Berechnet anhand der Regressionsgerade zeigt sich eine Frischmassesteigerung von 0,64% bei einer Erhöhung der Tageslichtsumme um 1%. Bei Erhöhung des Tageslichtsumme um 1% durch Supplementierung mit blauen LEDs ergibt sich eine Frischmassesteigerung von 8,9%, bei grünen bzw. roten LEDs von 11,1% bzw. 11,2%
- (4) Die partiellen Korrelationskoeffizienten (siehe Tabelle 12.26) bestätigen den positiven Zusammenhang zwischen Frischmasse und Tageslichtsumme. Es gibt keine signifikanten Korrelationen mit einzelnen Spektralbereichen

→ Die Frischmasse wird positiv durch steigende Bestrahlungsstärken beeinflusst. Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Bestrahlungsstärken der Zusatzbestrahlungen und Leuchtstoffröhren kann durch eine gezielte Supplementierung mit kurzwelligem Blau/ Grün/ Rotlicht die Frischmassesteigerung deutlich erhöht werden

Für die Verwaltung der Literatur wurde das Literaturverwaltungsprogramm Mendeley verwendet.

5. ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Die Beeinflussung wertgebender Inhaltsstoffe und des Pflanzenwachstums in *P. odorata* durch das Licht erfolgte durch Lichtmodifizierungen mittels Zuschaltung von LEDs und Überdeckung mit photoselektiven Folien. Unterschiede gab es zudem bezüglich des Versuchsstandortes und den entsprechenden Kultivierungsbedingungen, einschließlich der Grundbelichtung. Folglich müssen bei der Diskussion nicht nur die Lichtmodifikationen beachtet werden, sondern auch die jeweiligen Versuchsbedingungen.

Durch den begrenzten Platz in den Klimakammern liefen die Varianten nicht parallel und sind mit Bezug auf die jeweilige Kontrolle zu betrachten. Die abnehmenden PAR-Werte der Kontrollbeleuchtung (Tabelle 4.3) ermöglichen eine Abschätzung des Einflusses der Bestrahlungsstärke auf die Untersuchungsparameter. Als Grundlage für einen Vergleich der Versuchsreihen im Gewächshaus untereinander werden die Tageslichtsummen herangezogen. Die Berechnung multipler Korrelationen (siehe Anhang 5) ermöglicht die Einbeziehung der versuchszeitraumabhängigen Tages- und Nachttemperaturen, die bei Relevanz dargestellt werden.

5.1 Beeinflussung wertgebender Inhaltsstoffe durch das Licht

Die Beeinflussung wertgebender Inhaltsstoffe durch verschiedene Lichtbedingungen wurde anhand der Bestimmung organischer Inhaltsstoffe (Ascorbinsäure, Carotinoide, Polyphenole, Flavonoide, Anthocyane, antioxidative Kapazität) untersucht. Da Chlorophylle keine Relevanz für den Nährwert der Pflanzen haben, befinden sich die Werte im Anhang. An geeigneter Stelle wird auf diese verwiesen.

Angegeben sind die Inhaltsstoffgehalte nach drei Wochen Versuchslaufzeit, d.h. zu Versuchsende. In zwei Versuchsreihen wurden zudem die Gehalte anorganischer Inhaltsstoffe (Nitrat, Phosphor, Kalium, Magnesium, Calcium, Eisen) analysiert.

5.1.1 Ascorbinsäure

Die Ascorbinsäure ist von den untersuchten Inhaltsstoffen der einzige, der durch seine Klassifizierung als Vitamin lebensnotwendig ist und wird deswegen an erster Stelle behandelt. Obgleich es viele Untersuchungen bezüglich der Beeinflussung des Ascorbinsäuregehalts durch die Kultivierungsbedingungen, auch das Licht, gibt, liefern bisherige Studien keine eindeutigen Ergebnisse.

Der Ascorbinsäuregehalt in den Klimakammerversuchen lag unter Kontrollbedingungen bei 73,36-127,53 mg 100 g⁻¹ FM (Tabelle 5.3) und zeigt insgesamt eine geringere Spannweite als in den Gewächshausversuchen (60,34-246,00 mg 100 g⁻¹ FM; Tabelle 5.2). Für Ascorbinsäuregehalte in *P. odorata* liegen keine Referenzwerte vor. Der Vergleich mit anderen Gemüsekräutern zeigt, dass die bestimmten

Ascorbinsäuregehalte im Bereich von *Ocimum basilicum* (ca. 170 mg 100 g⁻¹ FM) und *Petroselinum sativum* (138,40-347,60 mg 100 g⁻¹ FM) liegen, bei denen die Gehalte jedoch stark zwischen verschiedenen Studien schwankten (KARKLELIENE et al., 2014; LEAHU et al., 2013).

Die Ascorbinsäuregehalte in den Kontrollen der Versuche in der **Klimakammer** unterschieden sich deutlich (Tabelle 5.1). Der höchste Ascorbinsäuregehalt wurde bei der geringsten Tageslichtsumme (FLb) gemessen. Aufgrund der kontrollierbaren Bedingungen können die Unterschiede auf die abnehmenden Bestrahlungsstärken der Leuchtstoffröhren zurückgeführt werden. Zusätzliche **LEDs** senkten in allen LED-Varianten den Ascorbinsäuregehalt im Vergleich zur Kontrolle (Tabelle 5.1), durch die rote LED-Beleuchtung signifikant.

Tabelle 5.1: Beeinflussung des Ascorbinsäuregehalts [mg 100 g⁻¹ FM] von *P. odorata* durch eine Zusatzbestrahlung mit LEDs: nach drei Wochen, kultiviert in der Klimakammer (Versuchsjahr 2013) unter kontrollierten Bedingungen; beschrieben werden die Gehalte in den LED-Varianten im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle

Lichtvariante*	LICHTBEDINGUNGEN		ASCORBINSÄUREGEHALT***	
	PAR-Wert [μmol m ⁻² s ⁻¹] ^{**}	Tageslichtsumme [mol m ⁻² d ⁻¹] ^{**}	[mg 100 g ⁻¹ FM]	% Veränderungen gegenüber Kontrolle
FLb	81,17	4,68	127,53 ±10,47	
FL+B	87,96	5,07	121,27 ±6,96	-4,9
FLg	113,1	6,51	73,78 ±7,84	
FL+G	109,35	6,30	69,17 ±5,47	-6,3
FLr	157,31	9,06	100,66 ^a ±10,04	
FL+R	149,50	8,61	72,32 ^b ±6,71	-28,2

*FL+R= Ergänzung der Grundbelichtung durch rote LEDs (zugehörige Kontrolle: FLr), FL+G= Ergänzung der Grundbelichtung durch grüne LEDs (zugehörige Kontrolle: FLg), FL+B= Ergänzung der Grundbelichtung durch blaue LEDs (zugehörige Kontrolle: FLb)

**Zu Beginn des Versuchszeitraums

***Angabe sind Mittelwerte und Standardabweichungen; unterschiedliche Buchstaben bezeichnen signifikante Unterschiede zwischen LED-Variante und zugehöriger Kontrolle, fehlende Buchstaben bedeuten keine signifikanten Unterschiede (Tukey-test, P≤0.05), n=4

Im **Gewächshaus** (Tabelle 5.2) unterschieden sich die Ascorbinsäuregehalte der Kontrollen deutlich zwischen den Versuchsreihen (60,34 bis 246,00 mg 100 g⁻¹ FM) und waren in den meisten Versuchsreihen höher als in den Klimakammerversuchen (Tabelle 5.1). Deutlich ist der Unterschied zwischen den Ascorbinsäuregehalten der beiden Versuchsjahre, mit geringeren Werten im Versuchsjahr 2013, trotz vergleichbarer Tageslichtsummen (Abbildung 5.1). Folglich kann unter Berücksichtigung der letzten drei Tage vor der Probenahme kein Zusammenhang zwischen den Tageslichtsummen und den Ascorbinsäuregehalten erkannt werden kann (R²=0,00, nicht signifikant, siehe Anhang, Tabelle 12.24).

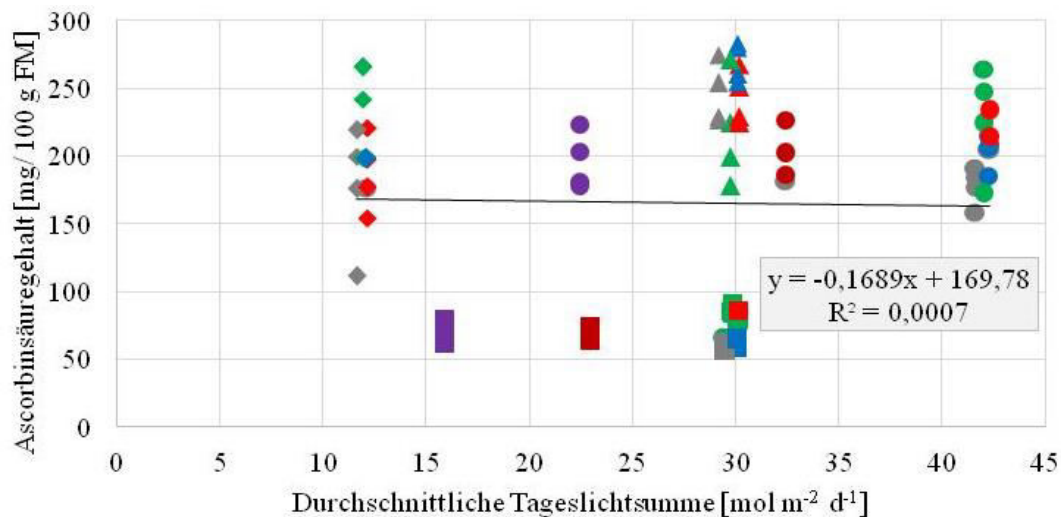


Abbildung 5.1: Zusammenhang zwischen durchschnittlicher Tageslichtsumme an den letzten drei Versuchstagen vor der Probenahme und dem Ascorbinsäuregehalt [mg/ 100 g FM] der Kontrollen im Gewächshaus; Quadrate: „GwH13“, Kreise: „GwH14“, Rauten: „GwH14, nachts“, Dreiecke: „GwH14, 24h“; Regressionsgerade mit Regressionskoeffizienten (R^2) und Formel bezieht sich auf die Kontrollen (grau)

Möglicherweise können Wechselwirkungen mit den **Temperaturen** die unterschiedlichen Ascorbinsäuregehalte in den verschiedenen Versuchsreihen erklären. Zumindest deuten Studien mit *Arabidopsis thaliana* und *Solanum lycopersicum* Wechselwirkungen zwischen Lichtintensität und Nachttemperatur bezüglich der Ascorbinsäureakkumulation an (LAING et al., 2017; MASSOT et al., 2013). Geringe Temperaturen bei hohen Lichtintensitäten, welche bei kalten Nächten während der Morgenstunden vorliegen, werden mit einer Verringerung der Photosyntheserate assoziiert, wodurch weniger absorbierte Lichtenergie für die Kohlenstoffdioxidfixierung verwendet wird und vermehrt Elektronen unter Bildung reaktiver Sauerstoffspezies auf Sauerstoff übertragen werden (ALLEN und ORT, 2001; HUNER et al., 1998; TAYLOR und ROWLEY, 1971). Zugleich führen sowohl höhere Lichtintensitäten, als auch geringere Temperaturen zu einer gesteigerten Akkumulation bzw. Aktivierung des Photorezeptor PhyB (JUNG et al., 2016; LEGRIS et al., 2016) sowie des Transkriptionsfaktors HY5 (TOLEDO-ORTIZ et al., 2014) und zugleich zu einer Inaktivierung des PI-Faktors 5 (KUMAR et al., 2016). Ein Zusammenhang der Regulatoren mit der Ascorbinsäurekonzentration ist nicht bekannt, jedoch werden niedrige Temperaturen mit der Initiierung von Mechanismen in der Pflanze assoziiert, die auch bei hohen Lichtintensitäten beobachtet werden und bei vielen anderen Pflanzen in einem positiven Zusammenhang mit der Ascorbinsäureakkumulation standen (DOWDLE et al., 2007; LAING et al., 2017; WANG et al., 2009; YABUTA et al., 2007; ZHANG et al., 2009). Übertragen auf die vorliegenden Ergebnisse können die hohen Ascorbinsäuregehalte in der Versuchsreihe „GwH14, 24h“ somit möglicherweise durch die vergleichsweise kalten Nächten (ca. 19°C) (Abbildung 4.13) erklärt werden. Hingegen waren in der Versuchsreihe „GwH13“ die Tageslichtsummen in den letzten 3 Tagen geringer bei höherer Nachttemperatur (25°C) und könnten folglich die geringen Ascorbinsäuregehalte in der Versuchsreihe begründen. Die Berechnung multipler Korrelationskoeffizienten bestätigt einen Einfluss der Tages- und Nachttemperatur ($R^2=0,80$) auf den Ascorbinsäuregehalt. In Kombination mit der Tageslichtsumme wurde für die Nachttemperatur ein leicht höheres Bestimmtheitsmaß berechnet ($R^2=0,82$) als für die Tagestemperatur

($R^2=0,80$). Eine Berücksichtigung der drei Komponenten ($R^2=0,82$) ist in einem ähnlichen Maße geeignet für die Klärung der Varianz zwischen den Versuchsreihen. Die Diskrepanz der Ascorbinsäuregehalte in der Klimakammer und Gewächshaus kann jedoch nicht durch die Temperaturen erklärt werden. Die Tages (24 °C)- und Nachttemperaturen (19 °C) in der Klimakammer waren ähnlich wie in der Versuchsreihe „GwH14, 24h“, in welcher jedoch sowohl die Tageslichtsummen, als auch die Ascorbinsäuregehalte deutlich höher waren (Abbildung 4.10, Abbildung 4.13). Dies legt eine Beeinflussung durch die Grundbelichtung oder andere Faktoren nahe.

Versuchsreihenübergreifend wurde im Gewächshaus der Ascorbinsäuregehalt der Pflanzen tendenziell positiv durch die **LED**-Zusatzbeleuchtungen beeinflusst (Tabelle 5.2). In den Versuchsreihen „GwH13“, „GwH14“ und „GwH14, nachts“ hatten die Varianten mit grüner Zusatzbeleuchtung die höchsten Gehalte. In der Versuchsreihe „GwH13“ zeigten die Pflanzen mit grüner bzw. roter Zusatzbeleuchtung signifikant höhere Gehalte als die Kontrollen und die Pflanzen mit blauer Zusatzbeleuchtung.

Tabelle 5.2: Beeinflussung des Ascorbinsäuregehalts [$\text{mg } 100 \text{ g}^{-1} \text{ FM}$] von *P. odorata* durch eine Zusatzbestrahlung mit LEDs (B=Blau, G=Grün, R=Rot): kultiviert im Gewächshaus mit natürlichen Licht; beschrieben werden die Gehalte in den LED-Varianten (NL+B, NL+G, NL+R) im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (NL)

Bedingungen*	VERSUCHSREIHE							
	„GwH13“		„GwH14“		„GwH14, nachts“		„GwH14, 24 h“	
	TLS [$\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$]							
	29,46 ±12,50		41,64 ± 3,35		11,64 ± 6,02		29,16 ± 6,16	
TT [°C]	30,13 ± 3,88		23,82 ± 0,34		22,06 ± 1,12		21,24 ± 1,13	
Variante	ASCORBINSÄUREGEHALTE**							
	mg/ 100 g		[%]		mg/ 100 g		[%]	
	NL	60,34 ^b ±4,87		177,37 ±14,09		176,44 ±46,91		246,00 ±22,58
	NL+B	66,40 ^b ±5,72	+10,0	202,76 ±12,46	+14,3	192,94 ±11,52	+9,4	269,69±14,05 +9,6
	NL+G	87,64 ^a ±2,86	+45,2	227,33 ±39,54	+26,2	243,10 ±31,64	+37,8	242,88 ±20,16 -1,3
	NL+R	81,99 ^a ±2,42	+35,9	215,38 ±13,44	+21,4	187,40 ±28,46	+6,2	218,18 ±39,95 -11,3

*Durchschnittliche Tageslichtsummen (TLS) und Tagestemperatur (TT) der Kontrolle, berechnet für die letzten drei Tage vor der Probenahme

**Angegeben sind Mittelwerte und Standardabweichungen; kursiv geschrieben: prozentuale Veränderungen im Vergleich zur Kontrolle; unterschiedliche Buchstaben bezeichnen signifikante Unterschiede innerhalb einer Versuchsreihe zwischen Behandlungen, fehlende Buchstaben bedeuten keine signifikanten Unterschiede (Tukey-test, $P \leq 0.05$), $n=4$

Überraschend war der geringe Effekt einer nächtlichen Zusatzbestrahlung auf den Ascorbinsäuregehalt, da bei anderen Spezies Schwankungen des Ascorbinsäuregehalt zwischen Licht- und Dunkelperiode beobachtet wurden, zurückgeführt auf negative Regulatoren bei Dunkelheit (WANG et al., 2013a; WANG et al., 2009). Zumindest in der Versuchsreihe „GwH14, nachts“ wurden leichte bis deutliche Gehaltssteigerungen durch eine Zusatzbestrahlung gemessen. Diesbezüglich könnte relevant gewesen sein, dass die Probenahme in der Versuchsreihe „GwH14, nachts“ ca. eine Stunde nach Sonnenaufgang erfolgte, in der Versuchsreihe „GwH14, 24h“ nach drei Stunden, in denen auch in den Kontrollen eine mögliche lichtinduzierte Ascorbinsäuresynthese stattgefunden haben könnte. Im Vergleich zu den Versuchen mit einer Zusatzbestrahlung als Ergänzung zum Tageslicht sind die vergleichsweise geringen Reaktionen auf eine nächtliche Bestrahlung jedoch unerwartet.

Durch eine Überdeckung mit **photoselektiven Folien** (Tabelle 5.3) wurde der Ascorbinsäuregehalt in der **Klimakammer** lediglich in der Variante PL57% signifikant erhöht. Da keine Beeinflussung in der Variante HMG55% beobachtet wurde, kann dies eine Beeinflussung durch die spektrale Lichtzusammensetzung andeuten. Eine tendenzielle Verringerung des Ascorbinsäuregehalts in der Variante PL40% lässt zusätzlich einen Einfluss der Lichtintensität vermuten. Dies lässt sich durch den Vergleich der Kontrollen jedoch nicht bestätigen, da FLp1 den höchsten Ascorbinsäuregehalt und zugleich die geringste Lichtintensität aufwies (Tabelle 4.3).

Tabelle 5.3: Beeinflussung des Ascorbinsäuregehalts [mg 100 g⁻¹ FM] von *P. odorata* durch eine Überdeckung mit photoselektiven Folien: nach drei Wochen, kultiviert in der Klimakammer (Versuchsjahr 2013) unter kontrollierten Bedingungen; beschrieben werden die Gehalte in den Folien-Varianten im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle

Lichtvariante*	LICHTBEDINGUNGEN		ASCORBINSÄUREGEHALT***	
	PAR-Wert [μmol m ⁻² s ⁻¹] ^{**}	Tageslichtsumme [mol m ⁻² d ⁻¹] ^{**}	[mg 100 g ⁻¹ FM]	% Veränderungen gegenüber Kontrolle
FLh1	113,1	6,51	73,78 ± 7,84	
HMG72%	81,43	4,69	79,34 ± 11,41	+7,5
FLp1	81,17	4,68	127,53 b ± 10,47	
PL57%	46,27	2,67	156,11 a ± 8,58	+22,4
FLh2	190,06	10,95	73,36 ± 15,86	
HMG55%	104,53	6,02	73,74 ± 3,51	+0,5
FLp2	157,31	9,06	100,66 ± 10,04	
PL40%	62,92	3,62	91,03 ± 5,26	-9,6

* FL+HMG72%= Überdeckung der Pflanzen mit der Half Minus Green-Folie, erreichte Lichtintensität: 72% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLh1), FL+PL57%= Überdeckung der Pflanzen mit der Pale Lavander-Folie, erreichte Lichtintensität: 57% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLp1), FL+HMG55%= Überdeckung der Pflanzen mit der Half Minus Green-Folie, erreichte Lichtintensität: 55% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLh2), FL+PL40%= Überdeckung der Pflanzen mit der Pale Lavander-Folie, erreichte Lichtintensität: 40% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLp2),

** Zu Beginn des Versuchszeitraums

*** Angegeben sind Mittelwerte und Standardabweichungen; unterschiedliche Buchstaben bezeichnen signifikante Unterschiede zwischen Folien-Variante und zugehöriger Kontrolle, fehlende Buchstaben bedeuten keine signifikanten Unterschiede (Tukey-test, P≤0.05), n=4

Tabelle 5.4: Beeinflussung des Ascorbinsäuregehalt [mg 100 g⁻¹ FM] von *P. odorata* durch eine Überdeckung mit photoselektiven Folien (HMG=Half Minus Green, PL=Pale Lavander): nach drei Wochen, kultiviert im Gewächshaus mit natürlichen Licht; beschrieben werden die Gehalte in den LED-Varianten (NL+B, NL+G, NL+R) im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (NL)

		VERSUCHSREIHE			
		„GwH13“		„GwH14“	
Bedingungen*	TLS [mol m ⁻² d ⁻¹]	29,46 ±12,50		41,64 ± 3,35	
	TT [°C]	30,13 ± 3,88		23,82 ± 0,34	
Variante		ASCORBINSÄUREGEHALTE**			
		mg/ 100 g	[%]	mg/ 100 g	[%]
	NL	60,34 b ±4,87		177,37 ±14,09	
	NL+HMG	69,39 ab ±5,68	+15,0	199,25 ±20,10	+12,3
	NL+PL	73,09 a ±8,02	+21,1	196,48 ±21,00	+10,8

*Durchschnittliche Tageslichtsummen (TLS) und Tagestemperatur (TT) der Kontrolle, berechnet für die letzten drei Tage vor der Probenahme

**Angegeben sind Mittelwerte und Standardabweichungen; kursiv geschrieben: prozentuale Veränderungen im Vergleich zur Kontrolle; unterschiedliche Buchstaben bezeichnen signifikante Unterschiede innerhalb einer Versuchsreihe zwischen Behandlungen, fehlende Buchstaben bedeuten keine signifikanten Unterschiede (Tukey-test, P≤0.05), n=4

Im **Gewächshaus** bewirkte in beiden Versuchsreihen eine Überdeckung mit **photoselektiven Folien** eine tendenzielle Erhöhung des Ascorbinsäuregehalts. Ähnlich wie in der Klimakammer („PL57%“) führte die PL-Folie in der Versuchsreihe „GwH13“ bei vergleichbarer Reduktion der Tageslichtsumme (Tabelle 4.11) zu einer signifikanten Erhöhung des Ascorbinsäuregehalts (Tabelle 5.4).

Der Zusammenhang zwischen Tageslichtsumme und Ascorbinsäuregehalt wird auch graphisch deutlich (Abbildung 5.2). Durch die zugehörige Regressionsgerade (bezogen auf die Kontrollen) werden die erwarteten Ascorbinsäurekonzentrationen in Abhängigkeit von der Tageslichtsumme ohne Veränderung der spektralen Lichtzusammensetzung dargestellt. Insgesamt zeigt die Regressionsgerade einen negativen Zusammenhang zwischen Tageslichtsumme und Ascorbinsäuregehalt, bestätigt durch die entsprechenden Korrelationskoeffizienten (Tabelle 5.5). Jedoch gibt es bei Tageslichtsummen $> 6 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ nur geringfügige Unterschiede zwischen den Varianten, was möglicherweise ein Grund ist, warum grüne LEDs in der Klimakammer keine positiven Wirkungen zeigten. Überraschenderweise war der Ascorbinsäuregehalt in der Variante FL+R nur im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle gering, unter Einbeziehung aller Kontrollen jedoch im Bereich des Erwartungswertes.

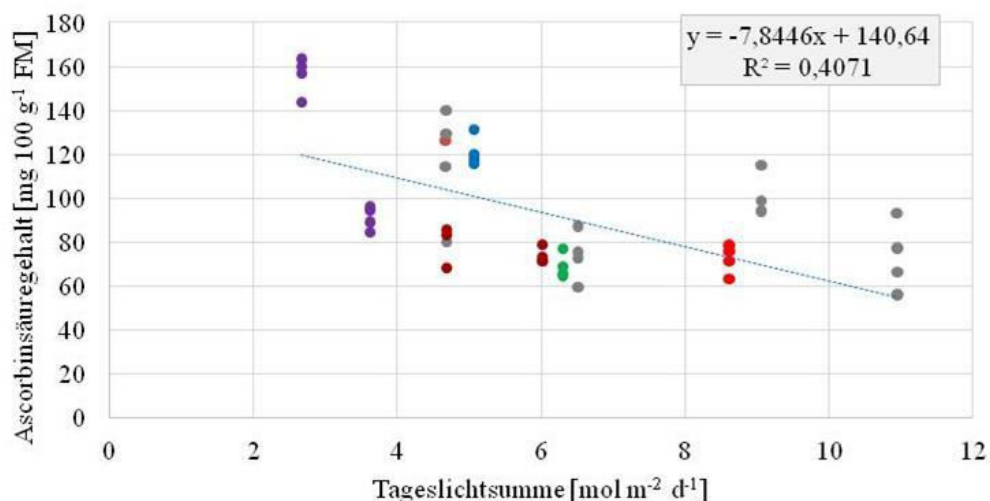


Abbildung 5.2: Zusammenhang zwischen Tageslichtsumme und dem Ascorbinsäuregehalt in der Klimakammer; Unterschiede der Lichtzusammensetzung nicht berücksichtigt. Dargestellt sind Mittelwerte der einzelnen Varianten (n=4); grau: FL, blau: FL+B, grün: FL+G, rot: FL+R, lila: FL+PL, dunkelrot: FL+HMG; Regressionsgerade mit Regressionskoeffizienten (R^2) und Formel bezieht sich auf die Kontrollen (grau)

Die beobachteten Zusammenhänge zwischen Tageslichtsumme und Ascorbinsäuregehalt spiegeln sich in den Korrelationskoeffizienten der einzelnen Versuchsreihen wider (Tabelle 5.5). Aufgrund von Unterschieden zwischen den Versuchsreihen wird durch den gemittelten Korrelationskoeffizient jedoch kein eindeutiger Zusammenhang beschrieben. Dies gilt auch für die meisten anderen Lichteigenschaften. Relativ eindeutig ist nur eine positive Beeinflussung des Ascorbinsäuregehalts durch den kurzwelligen Grünlichtanteil, bedingt durch vorwiegend positive Korrelationskoeffizienten für den kurzwelligen Grünlichtanteil und negative Korrelationen mit den BR:G- und R:G-Verhältnissen.

Tabelle 5.5: Zusammenhang zwischen Lichteigenschaften und dem Ascorbinsäuregehalt in *P. odorata*, kultiviert in der Klimakammer bzw. im Gewächshaus mit Lichtmodifikationen durch zusätzliche LED-Beleuchtung oder photosensitive Folien; angegeben sind partielle Korrelationskoeffizienten nach Spearman (LED-Versuche im Gewächshaus) bzw. nach Pearson (LED-Versuche in der Klimakammer; Folien-Versuche in der Klimakammer und im Gewächshaus)

		Korrelationskoeffizienten											
		TLS*	Spektralbereichsanteile						Verhältnisse				
			401-450	451-500	501-550	551-600	601-650	651-700	B:R	BR:G	B:G	R:G	R:FR
LED	KK13	-0,55	0,16	-0,54	-0,17	0,04	-0,37	-0,24	0,29	0,19	0,21	0,08	k.A.
	GwH13	0,34	-0,82	-0,29	0,74	-0,00	-0,47	0,12	-0,03	-0,70	-0,76	-0,62	k.A.
	GwH14	0,43	-0,11	0,03	0,56	-0,00	0,00	-0,29	0,18	-0,62	-0,35	-0,57	k.A.
	GwH14, nachts	-0,21	-0,44	0,12	0,35	-0,15	0,01	-0,21	0,15	-0,45	-0,45	-0,53	k.A.
	GwH14, 24h	0,39	0,28	-0,26	0,10	-0,25	-0,31	-0,09	0,49	-0,10	0,40	-0,28	k.A.
Folie	KK13	-0,52	0,42	-0,07	0,09	-0,16	0,08	-0,20	0,50	-0,42	0,12	-0,14	-0,20
	GwH13	-0,68	-0,32	-0,14	0,10	-0,01	-0,13	0,20	-0,25	-0,18	-0,28	0,29	0,30
	GwH14	-0,41	-0,30	-0,11	0,03	-0,10	-0,12	0,21	-0,35	-0,28	-0,41	0,40	0,32
Ø		-0,18	-0,19	-0,17	0,26	-0,08	-0,17	-0,06	0,13	-0,35	-0,22	-0,36	0,14

Fett geschrieben: signifikant ($P \leq 0.05$)

* TLS= Tageslichtsumme

Der Vergleich aller Versuchsreihen zeigt zwei Reaktionen der Pflanzen auf die modifizierten Lichtbedingungen: eine Gehaltsverringerung bei steigenden Tageslichtsummen in den Klimakammerversuchen und den Folienversuchen im Gewächshaus, wobei diese weitgehend unabhängig vom Spektralbereich war, und eine Gehaltssteigerung bei steigenden Tageslichtsummen in den LED-Versuchen im Gewächshaus mit einem positiven Einfluss des kurzwelligen Grünlichtanteils.

Der negative Zusammenhang zwischen **Tageslichtsumme** und Ascorbinsäuregehalt in den Klimakammerversuchen (LEDs und Folien) sowie den Folienversuchen im Gewächshaus steht im Widerspruch zu den übereinstimmend beschriebenen, positiven Zusammenhängen zwischen Lichtintensität und Ascorbinsäuregehalt in verschiedenen anderen Pflanzen (DOWDLE et al., 2007; LAING et al., 2017; WANG et al., 2009; YABUTA et al., 2007; ZHANG et al., 2009), begründet durch steigende Photosyntheseleistungen bei höheren Bestrahlungsstärken (YABUTA et al., 2007), lichtabhängige Expressionen beteiligter Enzyme (DOWDLE et al., 2007; LAING et al., 2017) und der lichtabhängigen Inaktivierung der negativen Regulatoren AMR1 (ASCORBIC ACID MANNOSE PATHWAY REGULATOR) (ZHANG et al., 2009) und CSN (WANG et al., 2009). Jedoch wurde von BERGQUIST et al. (2007) bei *Spinacia oleracea* L. beobachtet, dass Schattierungen den Ascorbinsäuregehalt bei verschiedenen Bestrahlungsstärken unterschiedlich beeinflussen können. Demnach bewirkten Schattierungen bei hohen Bestrahlungsstärken der Grundbelichtung eine signifikante Verringerung des Ascorbinsäuregehalts in *S. oleracea* L., bei geringeren Bestrahlungsstärken wurden die Ascorbinsäuregehalte durch eine Schattierung hingegen mitunter erhöht. Bezogen auf die vorliegenden Versuche könnte dies bedeuten, dass in der Klimakammer möglicherweise höhere Bestrahlungsstärken der Grundbelichtung erforderlich gewesen wären, um einen positiven Zusammenhang zwischen Ascorbinsäuregehalt und Bestrahlungsstärken nachweisen zu können. Dies könnte wiederum die gegensätzlichen Beobachtungen in den LED-Versuchen im Gewächshaus

erklären. Die Grundbelichtung im Gewächshaus war höher als in der Klimakammer und die Lichtmodifizierung mit LEDs erhöhte die Tageslichtsumme, anstatt sie, wie bei den Folienversuchen im Gewächshaus, zu verringern.

Überraschend ist zudem die positive Beeinflussung des Ascorbinsäuregehalts durch den **kurzwelligen Grünlichtanteil**. Bislang wurde in der Literatur vor allem eine positive Beeinflussung durch blaues (OHASHI-KANEKO et al., 2011) und rotes Licht (BARTOLI et al., 2006) beschrieben, zurückgeführt auf Aktivitätserhöhungen von Enzymen, die an der Ascorbinsäurebiosynthese beteiligt sind (OHASHI-KANEKO et al., 2011). Auch die Assoziation der Ascorbinsäurekonzentration mit der Photosynthese (YABUTA et al., 2007) bzw. einer vermehrten Akkumulierung als Prävention vor oxidativen Stress bei hohen Lichtintensitäten (BARTOLI et al., 2006) sind Argumente für eine fördernde Wirkung der blauen und roten Spektralbereiche. Mit Ausnahme einzelner Versuchsreihen wird dies durch die vorliegenden Ergebnisse nicht bestätigt. Im Gegenteil zeigte eine Supplementierung mit kurzwelligen Grünlicht im Gewächshaus eine positive Wirkung auf den Ascorbinsäuregehalt. Auch die geringen Ascorbinsäuregehalte in der Klimakammer im Vergleich zum Gewächshaus (Versuchsjahr 2014) könnten dadurch erklärt werden. Die Leuchtstoffröhren in der Klimakammer emittierten kaum im kurzwelligen Grünlichtbereich bis ca. 535 nm (Abbildung 4.7). Unter der Annahme, dass dieser Spektralbereich einen wichtigen Einfluss auf die Ascorbinsäureakkumulierung hat, könnten die geringen Bestrahlungsstärken in diesem Bereich eine Erklärung für die gemessenen Gehalte sein. Jedoch erklärt dies nicht, warum in der Klimakammer keine Reaktionen auf eine Erhöhung des kurzwelligen Grünlichtanteils gemessen wurde. Der Einfluss des Grünlichtanteils auf wertgebende Inhaltsstoffe, auch auf den Ascorbinsäuregehalt in Pflanzen, wurde bislang kaum untersucht. Folgende Veröffentlichungen weisen aber auf die Bedeutung des grünen Lichtes für den Ascorbinsäuregehalt hin. SAMUOLIENE et al.(2012b) zeigten in *Lactuca sativa* einen positiven Effekt grüner LEDs (Wellenlängen 535 bzw. 505 nm) auf den Ascorbinsäuregehalt, deren Wirkung größer war als bei blauen LEDs (455 bzw. 470 nm). SAENGTHARATIN et al. (2018) erklärten die positive Wirkung des grünen Spektralbereichs auf den Ascorbinsäuregehalt von *Lactuca sativa* mit der geringen Absorption grüner Spektralbereiche durch Photosynthesepigmente, resultierend in einem tieferen Eindringen der Photonen in das Pflanzengewebe. Die genauen zellulären Vorgänge sind jedoch nicht bekannt. Möglicherweise sind Cryptochrome involviert, die zumindest im kurzwelligen Grünlichtbereich absorbieren (AHMAD et al., 2002; LIN et al., 1995). Von GALVEZ-VALDIVIESO et al.(2009) und PAGE et al.(2012) wird die reduzierte Nutzung des grünen Spektralbereichs für die Photosynthese mit einer übermäßigen Anregungsenergie durch Veränderungen des Redoxstatus von Photosynthese-Komponenten bzw. einer verstärkten ROS Produktion assoziiert, die durch VANDERAUWERA (2005) mit einer gesteigerten Expression der Dehydroascorbatreduktase in Verbindung gebracht wird, wodurch die Regenerierung des Ascorbats aus Dehydroascorbat gefördert wird. Auch BERGQUIST et al. (2007) wiesen in *Spinacia oleracea* L. einen höheren Ascorbinsäuregehalt bei Schattierungen nach, die eine hohe

Durchlässigkeit für grünes Licht hatten. Zugleich war der Dehydroascorbinsäuregehalt unter diesen Bedingungen am geringsten. Dies könnte ein Hinweis sein für ein verstärktes Ascorbinsäure-Recycling unter Lichtbedingungen mit einem hohen Grünlichtanteil.

Zusammenfassend kann die Beeinflussung des Ascorbinsäuregehalts durch das Licht nicht eindeutig beschrieben werden. In der Literatur beschriebene Gehaltserhöhungen durch steigende Bestrahlungsstärken wurden erst bei hohen Tageslichtsummen der Grundbelichtung beobachtet, während es bei geringeren Tageslichtsummen einen negativen Zusammenhang gab. Bei hohen Tageslichtsummen wurde zudem eine positive Beeinflussung durch den kurzwelligen Grünlichtanteil beobachtet. Neben einer unterschiedlichen Grundbelichtung, die ein Grund für die Gehaltsunterschiede in Klimakammer und Gewächshaus gewesen sein kann, spielte vermutlich auch die Temperatur eine wichtige Rolle, insbesondere beim Vergleich der Versuchsreihen im Gewächshaus untereinander.

Im Hinblick auf die ernährungsphysiologische Bedeutung ist bei einem Ascorbinsäuregehalt von 98,83 mg 100 g⁻¹ FM (durchschnittlicher Gehalt in den Kontrollen der Klimakammerversuche) ein Verzehr von 96 bzw. 111 g (w/m) *P. odorata* für die Erfüllung der Aufnahmeempfehlung der EFSA erforderlich. In der Klimakammer wurde der Ascorbinsäuregehalt am stärksten durch eine Überdeckung der Pflanzen mit der PL-Folie (57%) erhöht. Die Gehaltssteigerung von 22,4% reduziert die erforderliche Verzehrsmenge entsprechend auf 79 bzw. 91 g (w/m). Eine Kultivierung unter natürlichem Licht im Gewächshaus steigerte die Ascorbinsäuregehalte im Mittel um 67% im Vergleich zum kontrollierten Anbau. Eine zusätzliche Bestrahlung mit grünen LEDs erhöhte den Gehalt zusätzlich um durchschnittlich 27% (Tabelle 12.31). Dadurch reduziert sich die Verzehrsmenge zur Erfüllung der Aufnahmeempfehlung der EFSA auf 45 bzw. 52 g (w/m) pro Tag, wodurch die erforderliche Verzehrsmenge im Vergleich zu den Kontrollen der Klimakammer halbiert wird. Im Hinblick auf nicht erreichte Aufnahmeempfehlungen für Vitamin C von etwa 50% der Deutschen (TROESCH et al., 2012) und der, unter Ernährungswissenschaftlern diskutierten, positiven Effekte eines Verzehrs über die Aufnahmeempfehlungen hinaus, können die Ascorbinsäuregehaltssteigerungen durch veränderte Lichtbedingungen (Gewächshaus vs. Klimakammer, Lichtmodifikationen durch LEDs/ Folien) einen relevanten Beitrag zur Vitamin C-Versorgung beitragen.

5.1.2 Carotinoide

Carotinoide sind in ihrer Gesamtheit nicht als Vitamine klassifiziert. Einige Vertreter haben jedoch eine Provitamin A-Wirkung, sodass die Aufnahmeempfehlungen für Vitamin A und die individuellen Konversionsfaktoren eine Schätzung für den Bedarf ermöglichen. Carotinoidgehalte in *P. odorata* wurden bislang nur durch CZEZUGA (1987) bestimmt und, lichtabhängig, mit einem Gehalt von 128,5 µg/ g TG -164,1 µg/ g TG angegeben. Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit waren folglich deutlich höher. Im Vergleich zu anderen grünen Blattgemüsen liegen die bestimmten Carotinoidgehalte von 46,63-

58,91 mg 100 g⁻¹ FM ohne Lichtmodifizierung über denen von Salat (6,15-11,5 mg 100 g⁻¹ FM), Petersilie (23,2 mg 100 g⁻¹ FM) und Spinat (15,6 mg 100 g⁻¹ FM) (LARSEN und CHRISTENSEN, 2005).

Im Vergleich zu den anderen bestimmten organischen Inhaltsstoffen war die Spannweite der Carotinoidgehalte vergleichsweise gering. Somit wurde der Carotinoidgehalt insgesamt nur geringfügig durch die Kultivierungsbedingungen, einschließlich des Lichtes, verändert. In den Kontrollen der **Klimakammer** lagen die Gehalte zwischen 53,34-58,91 mg 100 g⁻¹ FM (Tabelle 5.6, Tabelle 5.8). Blaue und grüne **LEDs** veränderten die Gehalte kaum, rote LEDs führten zu einer signifikanten Verringerung (Tabelle 5.6).

Tabelle 5.6: Beeinflussung des Carotinoidgehalts [mg 100 g⁻¹ FM] von *P. odorata* durch eine Zusatzbestrahlung mit LEDs: nach drei Wochen, kultiviert in der Klimakammer (Versuchsjahr 2013) unter kontrollierten Bedingungen; beschrieben werden die Gehalte in den LED-Varianten im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle

Lichtvariante*	LICHTBEDINGUNGEN		CAROTINOIDGEHALT***	
	PAR-Wert [μmol m ⁻² s ⁻¹]**	Tageslichtsumme [mol m ⁻² d ⁻¹]**	[mg 100 g ⁻¹ FM]	% Veränderungen gegenüber Kontrolle
FLb	81,17	4,68	55,15 ±2,91	
FL+B	87,96	5,07	56,65 ±1,89	+2,7
FLg	113,1	6,51	58,91 ±4,11	
FL+G	109,35	6,30	60,15 ±1,83	+6,0
FLr	157,31	9,06	53,34a ±3,16	
FL+R	149,50	8,61	46,91b ±2,01	-12,1

*FL+R= Ergänzung der Grundbelichtung durch rote LEDs (zugehörige Kontrolle: FLr), FL+G= Ergänzung der Grundbelichtung durch grüne LEDs (zugehörige Kontrolle: FLg), FL+B= Ergänzung der Grundbelichtung durch blaue LEDs (zugehörige Kontrolle: FLb)

**Zu Beginn des Versuchszeitraums

***Angabe sind Mittelwerte und Standardabweichungen; unterschiedliche Buchstaben bezeichnen signifikante Unterschiede zwischen LED-Variante und zugehöriger Kontrolle, fehlende Buchstaben bedeuten keine signifikanten Unterschiede (Tukey-test, P≤0.05), n=4

Die Carotinoidgehalte der Kontrollen im **Gewächshaus** lagen mit 46,63-54,92 mg 100 g⁻¹ FM (Tabelle 5.7) in einem ähnlichen Bereich wie in der Klimakammer. Es kann kein tendenzieller Zusammenhang zwischen dem Carotinoidgehalt und der durchschnittlichen Tageslichtsumme an den letzten drei Tagen vor den Probenahmen beobachtet werden (Abbildung 5.3). Auch die multiplen Korrelationskoeffizienten (siehe Anhang, Tabelle 12.24) zeigen keinen signifikanten Zusammenhang zwischen Tageslichtsumme und Carotinoidgehalt (R²=0,00). Durch die Kombination mit der durchschnittlichen **Tages- und Nachttemperatur** wird hingegen ein signifikanter Anteil der Varianz erklärt (R²=0,48). Ein positiver Einfluss steigender Temperaturen auf den Carotinoidgehalt wurden bereits für Spinat (BOESE und HUNER, 1990) und Grünkohl (LEFSRUD et al., 2005) beschrieben. Möglicherweise kann dieser Zusammenhang zurückgeführt werden auf höhere photosynthetische Aktivitäten bei steigenden Temperaturen (BERNACCHI et al., 2001; HALDIMANN, 1999; TAYLOR und ROWLEY, 1971), wodurch der Photosyntheseapparat vergleichbare Anpassungen erfährt wie bei hohen Lichtintensitäten (CAMEJO et al., 2005). Entsprechend können Erhöhungen des Carotinoidgehalts begründet werden durch die photoprotektiven Eigenschaften einiger Substanzen, deren Gehaltsanstiege durch HALDIMANN et al. (1995) in *Zea mays* bei höheren Temperaturen nachgewiesen wurden. In der gleichen Veröffentlichung wurden jedoch auch

Anstiege des Violaxanthingehalts zur Unterstützung der Photosynthese bei niedrigen Temperaturen beschrieben, wodurch die ebenfalls vergleichsweise hohen Gehalte in der Versuchsreihe „GwH14, nachts“ erklärt werden könnten. Interessant wäre eine Untersuchung der Carotinoidzusammensetzung, die für die vorliegenden Ergebnisse jedoch nicht vorliegt.

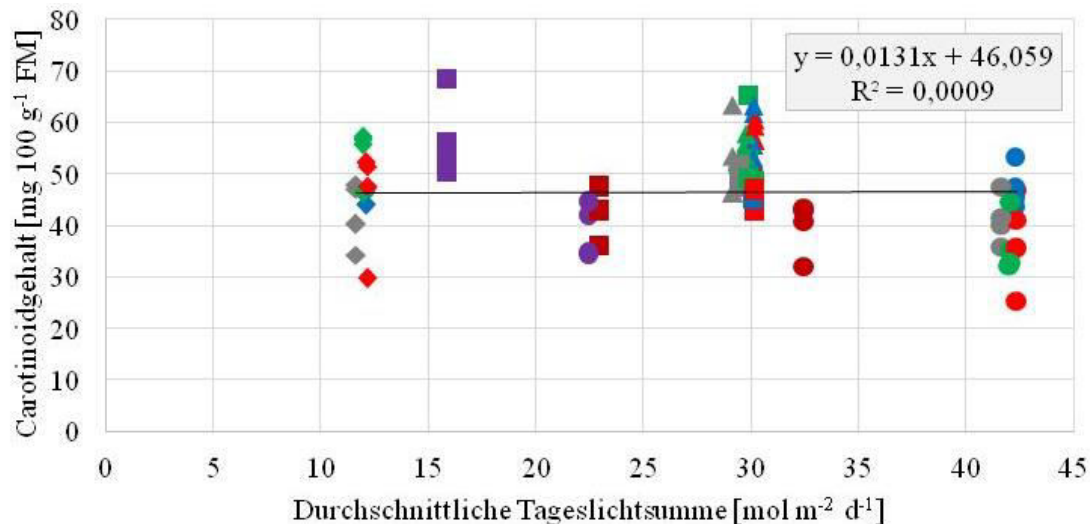


Abbildung 5.3: Zusammenhang zwischen durchschnittlicher Tageslichtsumme an den letzten drei Versuchstagen vor Probenahme und Carotinoidgehalt [mg/ 100 g FM] im Gewächshaus; Quadrate: „GwH13“, Kreise: „GwH14“, Rauten: „GwH14, nachts“, Dreiecke: „GwH14, 24h“; Regressionsgerade mit Regressionskoeffizienten (R^2) und Formel bezieht sich auf die Kontrollen (grau)

Eine zusätzliche Bestrahlung mit **LEDs** hatte in allen Versuchsreihen im Gewächshaus eine geringe, nicht signifikante, Wirkung auf den Carotinoidgehalt (Tabelle 5.7). Blaue („GwH14“, „GwH14, nachts“, „GwH14, 24h“) und grüne LEDs („GwH13“, „GwH14, nachts“, „GwH14, 24h“) führten in je drei Versuchsreihen zu tendenziell höheren Gehalten im Vergleich zur Kontrolle (Tabelle 5.7). Bei den Versuchen mit roten LEDs wurde in zwei Versuchsreihen ein höherer Wert bestimmt („GwH14, nachts“, „GwH14, 24h“).

Tabelle 5.7: Beeinflussung des Carotinoidgehalts [mg 100 g⁻¹ FM] von *P. odorata* durch eine Zusatzbestrahlung mit LEDs (B=Blau, G=Grün, R=Rot): kultiviert im Gewächshaus mit natürlichen Licht; beschrieben werden die Gehalte in den LED-Varianten (NL+B, NL+G, NL+R) im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (NL)

Bedingungen*		VERSUCHSREIHE											
		„GwH13“		„GwH14“		„GwH14, nachts“		„GwH14, 24 h“					
TLS [mol m ⁻² d ⁻¹]		29,46 ±12,50		41,64 ± 3,35		11,64 ± 6,02		29,16 ± 6,16					
TT [°C]		30,13 ± 3,88		23,82 ± 0,34		22,06 ± 1,12		21,24 ± 1,13					
Variante		CAROTINOIDGEHALTE**											
		mg/ 100 g		[%]		mg/ 100 g		[%]		mg/ 100 g		[%]	
	NL	49,75 ±1,92		41,14 ±4,76		42,38 ±6,39		52,43 ±8,01					
	NL+B	46,79 ±1,99	-6,0	47,45 ±4,21	+15,3	46,68 ±3,80	+10,2	58,45 ±4,84	+11,5				
	NL+G	54,92 ±7,05	+10,4	36,15 ±5,77	-12,1	53,95 ±5,10	+27,3	53,97 ±4,26	+2,9				
	NL+R	46,63 ±2,57	-6,3	37,21 ±9,21	-9,6	44,04 ±9,70	+3,9	56,94 ±4,08	+8,6				

*Durchschnittliche Tageslichtsummen (TLS) und Tagestemperatur (TT) der Kontrolle, berechnet für die letzten drei Tage vor der Probenahme

**Angabe sind Mittelwerte und Standardabweichungen; kursiv geschrieben: prozentuale Veränderungen im Vergleich zur Kontrolle; unterschiedliche Buchstaben bezeichnen signifikante Unterschiede innerhalb einer Versuchsreihe zwischen Behandlungen, fehlende Buchstaben bedeuten keine signifikanten Unterschiede (Tukey-test, $P \leq 0.05$), $n=4$

Auch durch eine Überdeckung mit **photoselektiven Folien** wurde der Carotinoidgehalt kaum verändert. In der Klimakammer wurde der Carotinoidgehalt nur durch die Variante PL40% signifikant erhöht (Tabelle 5.8). Da die Variante PL57% keine Wirkung hatte, kann dies auf einen Einfluss der Tageslichtsumme hindeuten, der auch in der Abbildung 5.4 angedeutet wird. Der Vergleich der Wirkungen der Varianten PL57% und HMG55%, sowie der Carotinoidgehalte der Varianten HMG72% und PLp1 sind Indizien dafür, dass in dieser Versuchsreihe bei den betrachteten Bedingungen die spektrale Lichtzusammensetzung keinen Einfluss hatte.

Tabelle 5.8: Beeinflussung des Carotinoidgehalts [mg 100 g⁻¹ FM] von *P. odorata* durch eine Überdeckung mit photoselektiven Folien: nach drei Wochen, kultiviert in der Klimakammer (Versuchsjahr 2013) unter kontrollierten Bedingungen; beschrieben werden die Gehalte in den Folien-Varianten im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle

Lichtvariante*	LICHTBEDINGUNGEN		CAROTINOIDGEHALT***	
	PAR-Wert [μmol m ⁻² s ⁻¹]**	Tageslichtsumme [mol m ⁻² d ⁻¹]**	[mg 100 g ⁻¹ FM]	% Veränderungen gegenüber Kontrolle
FLh1	113,1	6,51	58,91 ±4,11	
HMG72%	81,43	4,69	59,31 ±3,83	+4,0
FLp1	81,17	4,68	55,15 ±2,53	
PL57%	46,27	2,67	56,25 ±4,72	+2,0
FLh2	190,06	10,95	55,56 ±2,91	
HMG55%	104,53	6,02	54,73 ±5,15	-1,5
FLp2	157,31	9,06	53,34 ^b ±3,16	
PL40%	62,92	3,62	63,05 ^a ±4,00	+18,2

* FL+HMG72%= Überdeckung der Pflanzen mit der Half Minus Green-Folie, erreichte Lichtintensität: 72% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLh1), FL+PL57%= Überdeckung der Pflanzen mit der Pale Lavander-Folie, erreichte Lichtintensität: 57% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLp1), FL+HMG55%= Überdeckung der Pflanzen mit der Half Minus Green-Folie, erreichte Lichtintensität: 55% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLh2), FL+PL40%= Überdeckung der Pflanzen mit der Pale Lavander-Folie, erreichte Lichtintensität: 40% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLp2),

** Zu Beginn des Versuchszeitraums

*** Angegeben sind Mittelwerte und Standardabweichungen; unterschiedliche Buchstaben bezeichnen signifikante Unterschiede zwischen Folien-Variante und zugehöriger Kontrolle, fehlende Buchstaben bedeuten keine signifikanten Unterschiede (Tukey-test, P≤0.05), n=4

Tabelle 5.9: Beeinflussung des Carotinoidgehalts [mg 100 g⁻¹ FM] von *P. odorata* durch eine Überdeckung mit photoselektiven Folien (HMG=Half Minus Green, PL=Pale Lavander): nach drei Wochen, kultiviert im Gewächshaus mit natürlichen Licht; beschrieben werden die Gehalte in den LED-Varianten (NL+B, NL+G, NL+R) im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (NL)

Bedingungen*		VERSUCHSREIHE			
		„GwH13“		„GwH14“	
TLS [mol m ⁻² d ⁻¹]		29,46 ±12,50		41,64 ± 3,35	
TT [°C]		30,13 ± 3,88		23,82 ± 0,34	
Variante		CAROTINOIDGEHALTE**			
		mg/ 100 g		mg/ 100 g	
		[%]		[%]	
	NL	49,75 ^{ab} ±1,92		41,14 ±4,76	
	NL+HMG	42,45 ^b ±4,74	-14,7	39,75 ±5,29	-3,4
	NL+PL	56,94 ^a ±8,11	+14,5	39,01 ±5,14	-5,2

*Durchschnittliche Tageslichtsummen (TLS) und Tagestemperatur (TT) der Kontrolle, berechnet für die letzten drei Tage vor der Probenahme

**Angegeben sind Mittelwerte und Standardabweichungen; kursiv geschrieben: prozentuale Veränderungen im Vergleich zur Kontrolle; unterschiedliche Buchstaben bezeichnen signifikante Unterschiede innerhalb einer Versuchsreihe zwischen Behandlungen, fehlende Buchstaben bedeuten keine signifikanten Unterschiede (Tukey-test, P≤0.05), n=4

Auch in der Versuchsreihe „GwH13“ wurden die höchsten Carotinoidgehalte in der PL-Variante beobachtet, mit signifikant höheren Werten als bei der HMG-Variante. Die Kontrolle unterschied sich nicht signifikant von den Folienvarianten (Tabelle 5.9). In der Versuchsreihe „GwH14“ gab es kaum Unterschiede zwischen den Varianten.

Abbildung 5.4 zeigt eine Abnahme des Carotinoidgehalts bei steigenden Tageslichtsummen in der Klimakammer. Bestätigt wird dieser Zusammenhang durch den Vergleich der Standorte mit höheren Carotinoidgehalten in der Klimakammer bei gleichzeitig deutlich geringeren Tageslichtsummen. Der Vergleich von Varianten mit ähnlichem Tageslichtsummen (FLb/FLp1, HMG72%, FL+B bzw. HMG55%, FL+G, FLg/FLh1) zeigt kaum Unterschiede, woraus abgeleitet werden kann, dass die spektrale Lichtzusammensetzung in den Klimakammerversuchen keinen wesentlichen Einfluss auf die Carotinoidgehalte hatte.

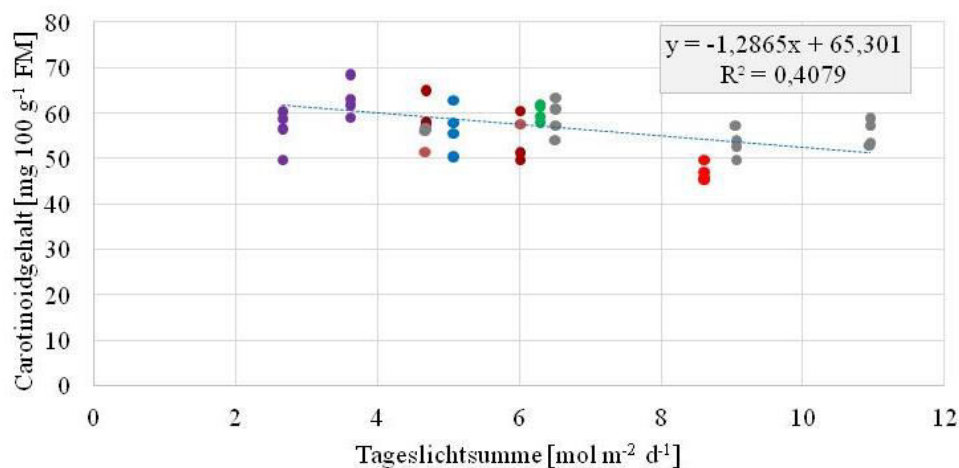


Abbildung 5.4: Zusammenhang zwischen Tageslichtsumme und dem Carotinoidgehalt in der Klimakammer. Dargestellt sind Mittelwerte der einzelnen Varianten (n=4); grau: FL, blau: FL+B, grün: FL+G, rot: FL+R, lila: FL+PL, dunkelrot: FL+HMG; Regressionsgerade mit Regressionskoeffizienten (R^2) und Formel bezieht sich auf die Kontrollen (grau)

Die Korrelationskoeffizienten (Tabelle 5.10) spiegeln die Beobachtungen der einzelnen Versuchsreihen wider. Versuchsreihenübergreifend sind jedoch kaum Gemeinsamkeiten erkennbar, wodurch aus den gemittelten Korrelationskoeffizienten keine Tendenz abgeleitet werden kann. Lediglich bezüglich des Einflusses des R:FR-Verhältnisses zeigte sich übereinstimmend ein negativer Zusammenhang mit dem Carotinoidgehalt. Es können jedoch weitere Tendenzen abgeleitet werden, wenn die Ergebnisse in zwei Gruppen unterteilt werden. In den Versuchsreihen „KK13“ und „GwH13“ (beide LEDs und Folien) stiegen die Carotinoidgehalte bei sinkenden Tageslichtsummen, einhergehend mit positiven Korrelationen mit dem langwelligen Grünlichtanteil und negativen Korrelationen mit den R:G- und R:FR-Verhältnissen. In den Versuchsreihen „GwH14“, „GwH14, nachts“ und „GwH14, 24h“ wurde hingegen eine tendenziell positive Beeinflussung durch die Tageslichtsumme beobachtet, ohne Wirkung der spektralen Lichtzusammensetzung.

Tabelle 5.10: Zusammenhang zwischen Lichteigenschaften und dem Carotinoidgehalt in *P. odorata*, kultiviert in der Klimakammer bzw. im Gewächshaus mit Lichtmodifikationen durch zusätzliche LED-Beleuchtung oder photosensitive Folien; angegeben sind partielle Korrelationskoeffizienten nach Spearman (LED-Versuche im Gewächshaus) bzw. nach Pearson (LED-Versuche in der Klimakammer; Folien-Versuche in der Klimakammer und im Gewächshaus)

		Korrelationskoeffizienten											
		TLS*	Spektralbereichsanteile						Verhältnisse				
			401-450	451-500	501-550	551-600	601-650	651-700	B:R	BR:G	B:G	R:G	R:FR
LED	KK13	-0,47	-0,08	0,30	0,09	0,16	0,08	-0,02	0,07	-0,44	-0,21	-0,68	k.A.
	GwH13	-0,58	-0,25	-0,10	0,57	0,25	-0,10	-0,40	-0,06	-0,70	-0,49	-0,53	k.A.
	GwH14	0,43	-0,11	0,03	0,56	-0,00	0,00	-0,29	0,18	-0,62	-0,35	-0,57	k.A.
	GwH14, nachts	0,13	-0,16	0,07	-0,08	-0,14	0,02	0,32	0,06	0,05	-0,08	-0,07	k.A.
	GwH14, 24h	0,36	0,10	-0,06	-0,03	-0,52	-0,07	0,39	0,12	-0,01	0,07	-0,11	k.A.
Folie	KK13	-0,32	-0,14	-0,06	-0,14	0,10	-0,15	0,04	0,12	0,09	0,19	0,17	-0,19
	GwH13	-0,40	-0,17	-0,62	-0,72	0,79	-0,80	0,63	0,73	0,73	0,67	-0,33	-0,69
	GwH14	0,19	0,60	-0,10	-0,13	0,42	0,02	-0,26	0,04	-0,05	0,07	0,48	-0,12
	Ø	-0,13	0,01	-0,02	-0,14	0,16	-0,12	0,12	0,20	0,03	0,09	-0,23	-0,37

Fett geschrieben: signifikant ($P \leq 0,05$)

* TLS= Tageslichtsumme

Der **negative Zusammenhang zwischen Tageslichtsumme** und Carotinoidgehalt in den Versuchsreihen „KK13“ und „GwH13“ (LEDs und Folien) könnte ein Hinweis sein für eine vermehrte Akkumulation unter Schattenbedingungen, bestätigt durch positive Korrelationen mit dem langwelligen Grünlichtanteil in den beiden Versuchsreihen („KK13“ und „GwH13“) und negative Korrelationen mit dem R:FR-Verhältnis bei den Folienversuchen. Im Schatten sind Pflanzen auf eine effizientere Lichtabsorption angewiesen, bei der einige Carotinoide aufgrund ihrer lichtsammelnden Eigenschaften unterstützend wirken (STYLINSKI et al., 2002). Insofern würden die vorliegenden Ergebnisse auch die Beobachtungen der Studie von CZECHUGA (1987) bestätigen, in der die Beeinflussung des Carotinoidgehalts durch Lichtbedingungen in *P. odorata* untersucht wurde. Eine Kultivierung im Schatten erhöhte den Gesamtcarotinoidgehalt im Vergleich zur direkten Sonne um etwa 30%. Der β -Carotiningehalt erhöhte sich um den Faktor 2,3, der Luteingehalt sank um 30%. Während ein funktioneller Zusammenhang zwischen sinkenden Tageslichtsummen und steigenden Carotinoidgehalten gegeben ist, sind die regulatorischen Hintergründe nicht abschließend geklärt. Im Gegenteil werden die negativen Regulatoren der Photomorphogenese, DDB1 und DET1 (DAVULURI et al., 2005, 2004; LEVIN et al., 2003; LIU et al., 2004; MUSTILLI et al., 1999), PI-Faktoren (TOLEDO-ORTIZ et al., 2010) und COP1 (LIU et al., 2004) mit Reduktionen des Carotinoidgehalts assoziiert, höhere Aktivitäten des positiven Transkriptionsfaktors HY5 mit einer Gehaltssteigerung (LIU et al., 2004). Ferner wurden höhere PAR-Werten mit einer positiven Beeinflussung der Transkriptionslevel aller Gene des MEP-Weges (CORDOBA et al., 2009; HSIEH und GOODMAN, 2005; KAWOOSA et al., 2010; RODRIGUEZ-CONCEPCION et al., 2004) und höheren Aktivitäten der Phytoene-Synthase in Zusammenhang gebracht (HARDING und TURNER, 1981; RODRÍGUEZ-VILLALÓN et al., 2009a; SHEWMAKER et al., 1999; SIMKIN et al., 2003). Erst kürzlich wurde jedoch als positiver Regulator der Genexpression der Phytoene-Synthase bei Schattenbedingungen der PIF-Antagonist PAR (=PHYTOCHROME-RAPIDLY REGULATED) identifiziert (BOU-TORRENT et al., 2015).

PAR1 und PAR2 agieren als negative Regulatoren des Schattenvermeidungssyndroms (HAO et al., 2012; ROIG-VILLANOVA et al., 2007, 2006) durch eine Beeinflussung der transkriptionalen Aktivitäten des PIF4 (HAO et al., 2012) und akkumulieren bei geringen Lichtintensitäten (ZHOU et al., 2014) und niedrigen R:FR-Verhältnissen (ROIG-VILLANOVA et al., 2007, 2006), während rotes und weißes Licht die Expression der Regulatoren unterdrückt (ZHOU et al., 2014). Eine mögliche Involvierung des PAR1 in die Regulation der Carotinoidakkumulation könnte folglich auch eine Erklärung für den negativen Zusammenhang mit dem R:FR-Verhältnis und die teilweise negative Beeinflussung des Carotinoidgehalts durch rote LEDs sein. Dies müsste durch weitergehende Untersuchungen geklärt werden. Die negative Beeinflussung des Carotinoidgehalts in der Klimakammer durch rote LEDs, die geringen Werte unter der HMG-Folie der Versuchsreihe „GwH13“ und die zugehörigen Korrelationskoeffizienten für den kurzwelligen Rotlichtanteil bestätigen die These der gehaltssteigernden Wirkung von Schattenlichtbedingungen. Jedoch wurden in verschiedenen Pflanzenarten phytochromevermittelte Steigerungen der Transkriptionslevel bzw. der Phytoene-Synthase-Aktivitäten durch rotes Licht beobachtet (LI u.a., 2008; SCHOFIELD und PALIYATH, 2005; VON LINTIG u.a., 1997; WELSCH u.a., 2000). Dass diese Beobachtungen in der vorliegenden Arbeit nicht bestätigt wurden, könnte möglicherweise damit zusammenhängen, dass das Emissionsspektrum der roten LEDs mit 629 nm nicht mit dem Absorptionsmaximum der Phytochrome (660 nm) übereinstimmte.

Der *positive Zusammenhang zwischen Carotinoidgehalt und Tageslichtsumme* in den Versuchsreihen im Gewächshaus des Jahres 2014 würde hingegen Studien mit anderen Pflanzen bestätigen, in denen eine Erhöhung des Carotinoidgehalts durch steigende Bestrahlungsstärken beobachtet wurde (BALLOTTARI et al., 2007; LOGAN et al., 1996), zurückgeführt auf die photoprotektive Wirkung einiger Carotinoide (FALBEL et al., 1994; FRANK et al., 1997) und eine präventive Absorption bestimmter Lichtquanten, wodurch die Reaktionszentren vor einer Überreduktion geschützt werden (FALBEL et al., 1994). In Gerste und Weizen wurde diesbezüglich ein Zusammenhang zwischen der Chlorophyllfluoreszenz und dem Carotinoidgehalt, insbesondere Vertretern des Xanthophyllzyklus, bestimmt (FALBEL et al., 1994). Eine Carotinoidakkumulation zwecks Prävention von photooxidativen Schädigungen könnte entsprechend mit einer erhöhten Konzentration reaktiver Sauerstoffspezies einhergehen. Als eine Screening-Methode hat sich die Messung der Chlorophyllfluoreszenz etabliert, deren Ergebnisse auf mögliche Schädigungen des photosynthetischen Elektronentransportes um das Photosystem II hindeuten können (BOLHAR-NORDENKAMPF et al., 1989; SIMKIN et al., 2003). In der vorliegenden Arbeit wurden in den Versuchsreihen „KK13“ und „GwH13“ die Chlorophyllfluoreszenzen bestimmt. In den Klimakammerversuchen (LEDs) lag das variable Chlorophyllfluoreszenzverhältnis F_v/F_m zwischen $0,81 \pm 0,02$ (FL+B) und $0,83 \pm 0,01$ (FL+R) und zeigte keine signifikanten Unterschiede zwischen den Behandlungen (Anhang 1, Tabelle 12.1). Bei einer Überdeckung der Pflanzen mit photoselektiven Folien lag das Verhältnis vergleichbar zwischen $0,80 \pm 0,02$ (PL57%) und $0,83 \pm 0,02$ (FLh2). In der Versuchsreihe „GwH13“ waren die Werte mit $0,79 \pm 0,02$ (NL+HMG) und $0,81 \pm 0,02$ (NL+R) vergleichbar

(Tabelle 12.2). Somit war vermutlich bei den beiden Versuchsreihen keine Akkumulation von Carotinoiden mit radikalquenchenden Eigenschaften erforderlich. Jedoch wurde die Chlorophyllfluoreszenz für die Versuchsreihen des Jahres 2014 nicht bestimmt, sodass diesbezüglich keine Aussage über einen möglichen photooxidativen Stress möglich ist. Etwas überraschend ist, dass der blaue Spektralbereich die Carotinoidakkumulation nicht beeinflusste. In Bezug auf eine Erhöhung des Blaulichtanteils wären Gehaltssteigerungen durch eine photorezeptor-vermittelte Induktionen der Phytoene-Synthase erwartet gewesen (LI et al., 2008). Jedoch konnten NINU et al. (1999) keine Beteiligung der Cryptochrome an der Carotinoidakkumulation nachweisen.

Insgesamt reagierte der Gesamtcarotinoidgehalt unterschiedlich auf die Lichtbedingungen. Zum einen gab es eine Gehaltssteigerung bei einer Verringerung der Tageslichtsumme und einer spektralen Lichtzusammensetzung, die charakteristisch ist für Schattenbedingungen. Jedoch kam es auch zu einer Gehaltssteigerung bei steigenden Tageslichtsummen. Für beide Möglichkeiten wäre jedoch eine Untersuchung der Carotinoidzusammensetzung sinnvoll, um die vermuteten funktionellen Zusammenhänge zu bestätigen. Die Versuche im Gewächshaus deuten zudem eine Beeinflussung durch die Temperatur an, möglicherweise im Zusammenspiel mit den Tageslichtsummen. Auch diesbezüglich wären weitere Untersuchungen notwendig.

Die Bedeutung der Gehaltsveränderungen für die Humanernährung ist schwer abzuschätzen, da die Carotinoidzusammensetzung nicht untersucht wurde. Die einzig nennenswerte Gehaltssteigerung fand in der Klimakammer durch eine Schattierung mit der PL-Folie (40%) statt, wodurch der Carotinoidgehalt um 18,2% gesteigert wurde. Unter Annahme eines β -Carotin-Anteils von 26,6 (CZECZUGA, 1987) würde die Gehaltserhöhung die erforderliche Verzehrsmenge zur Erfüllung der Aufnahmeempfehlung der EFSA für Vitamin A von ca. 80 g² *P. odorata* auf 65 g reduzieren. Zugleich wurde durch CZECZUGA (1987) nachgewiesen, dass der Gehalt an β -Carotin in *P. odorata* durch Schattierungen steigt, was bedeuten würde, dass Pflanzen bei Kultivierung unter Schattierungen möglicherweise bessere Provitamin A-Quellen darstellen. Eine Kultivierung im Gewächshaus führte im Durchschnitt zu einer leichten Reduktion des Carotinoidgehalts, die auch durch eine Modifizierung der Lichtbedingungen nicht ausgeglichen werden konnte.

5.1.3 Polyphenole

Ähnlich wie die Carotinoide umfassen auch die Polyphenole eine große Gruppe an Substanzen mit strukturellen Ähnlichkeiten und funktionellen Unterschieden. Da die Polyphenole in den letzten Jahren stark an Popularität gewonnen haben und die Polygonaceae für hohe Gehalte bekannt sind (SHEN et al., 2018), gibt es für *P. odorata* einige Referenzwerte in der Literatur. Deren Vergleichbarkeit ist jedoch

² Bei einer Erfüllung des Vitamin A-Bedarfs einzig durch die Aufnahme von Carotinoiden; verwendeter Konversionsfaktor: 12 mg β -Carotin $\hat{=}$ 1 mg RE (siehe Abschnitt 2.4.2.2)

aufgrund unterschiedlicher Untersuchungsmethoden und Bezugsparameter begrenzt (SINGLETON et al., 1999). In Bezug auf die Trockenmasse wurden Gehalte von 13,03 mg GAE g⁻¹ TG (AHONGSHANGBAM et al., 2014), 52,0 µg GAE mg⁻¹ TG (NANASOMBAT und TECKCHUEN, 2009), 64,8 mg GAE g⁻¹ TG (MAI et al., 2007) und 216,74 µg GAE mg⁻¹ TG (WORARATPHOKA et al., 2012) gemessen. Bezogen auf die Frischmasse bestimmten ZHENG und WANG (2001) einen Polyphenolgehalt von 3,09 mg GAE g⁻¹, AREEKUL und PHOMKAIVON (2015) 853,10 g 100 g⁻¹ FM. Im Rahmen dieser Arbeit wurde in den Kontrollen Gehalte von 525-1594 mg GAE 100 g⁻¹ FM (Klimakammer) bzw. 400-1120 mg GAE 100 g⁻¹ FM (Gewächshaus) gemessen. Bei einem durchschnittlichen Trocken-massegehalt von 12,81% in der Klimakammer und 13,41% im Gewächshaus ergeben sich rechnerisch Gehalte von 40,98-124,42 mg GAE g⁻¹ TM für die Klimakammer- und 26,83-83,46 mg GAE g⁻¹ TM für die Gewächshausversuche. Somit liegen die Werte unter Berücksichtigung natürlicher Schwankungen und unterschiedlicher Kultivierungsbedingungen im Bereich der Literaturwerte.

Die Polyphenolgehalte in den Kontrollen der **Klimakammerversuche** lagen zwischen 785,09-1416,35 mg GAE 100 g⁻¹ FM (Tabelle 5.11, Tabelle 5.13) und zeigten einen negativen Zusammenhang mit der Tageslichtsumme (Abbildung 5.6). **LEDs** beeinflussten die Gehalte unterschiedlich. Rote und grüne LEDs bewirkten einen tendenziellen Anstieg des Polyphenolgehalts, blaue LEDs führten zu einer signifikanten Verringerung (Tabelle 5.11).

Tabelle 5.11: Beeinflussung des Polyphenolgehalts [mg 100 g⁻¹ FM] von *P. odorata* durch eine Zusatzbestrahlung mit LEDs: nach drei Wochen, kultiviert in der Klimakammer (Versuchsjahr 2013) unter kontrollierten Bedingungen; beschrieben werden die Gehalte in den LED-Varianten im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle

Lichtvariante*	LICHTBEDINGUNGEN		POLYPHENOLGEHALT***	
	PAR-Wert [µmol m ⁻² s ⁻¹]**	Tageslichtsumme [mol m ⁻² d ⁻¹]**	[mg 100 g ⁻¹ FM]	% Veränderungen gegenüber Kontrolle
FLb	81,17	4,68	1416,35a ±131,17	
FL+B	87,96	5,07	1154,18b ±145,30	-18,5
FLg	113,1	6,51	1215,70 ±95,65	
FL+G	109,35	6,30	1354,55 ±235,36	+11,4
FLr	157,31	9,06	785,09 ±143,56	
FL+R	149,50	8,61	988,55 ±192,84	+25,9

*FL+R= Ergänzung der Grundbelichtung durch rote LEDs (zugehörige Kontrolle: FLr), FL+G= Ergänzung der Grundbelichtung durch grüne LEDs (zugehörige Kontrolle: FLg), FL+B= Ergänzung der Grundbelichtung durch blaue LEDs (zugehörige Kontrolle: FLb)

**Zu Beginn des Versuchszeitraums

***Angaben sind Mittelwerte und Standardabweichungen; unterschiedliche Buchstaben bezeichnen signifikante Unterschiede zwischen LED-Variante und zugehöriger Kontrolle, fehlende Buchstaben bedeuten keine signifikanten Unterschiede (Tukey-test, P≤0.05), n=4

Der Vergleich der Versuchsreihen im **Gewächshaus** zeigt deutlich unterschiedliche Polyphenolgehalte in den Kontrollen (Tabelle 5.12), welche im Mittel geringere Werte aufwiesen als in der Klimakammer. Während die Versuche im Jahr 2014 einen positiven Zusammenhang zwischen den Gehalten und der **Tageslichtsumme** andeuten (Abbildung 5.5), weisen die Ergebnisse der Versuchsreihe „GwH13“ davon ab. Eine Berechnung multipler Korrelationskoeffizienten (siehe Anhang, Tabelle 12.24) zeigt eine sig-

nifikant positive Korrelation zwischen den Polyphenolgehalten in den Kontrollen und der durchschnittlichen Tageslichtsumme an den letzten drei Tage vor der Probenahme ($R^2=0,31$). Die Abweichungen der Versuchsreihe „GwH13“ deuten einen positiven Einfluss der **Temperatur** an, bestätigt durch multiple Korrelationskoeffizienten für Tageslichtsumme und Nacht- ($R^2=0,86$) bzw. und Tagestemperatur ($R^2=0,87$) bzw. und beider Temperaturen ($R^2=87$). Diesbezüglich scheinen die hohen Tages- und Nachttemperaturen in der Versuchsreihe „GwH13“ einen relevanten Einfluss auf die Akkumulierung der Polyphenole gehabt zu haben. Eine Erklärung dieser Beobachtung ist nach dem derzeitigen Kenntnisstand nicht möglich. Im Gegenteil wurden in Arabidopsis (LEYVA et al., 1995; OLSEN et al., 2008) Aktivitätserhöhungen der PAL, Schlüsselenzym der Polyphenolsynthese, bei sinkenden Temperaturen gemessen, resultierend in höheren Gehalten an Flavonoiden und Anthocyanen (OLSEN et al., 2008).

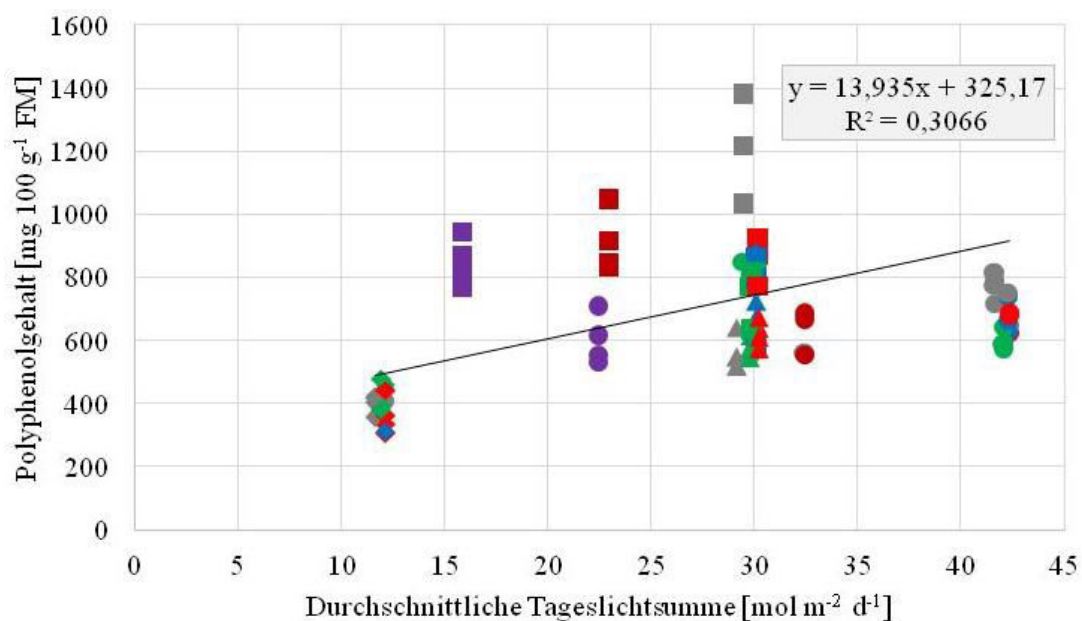


Abbildung 5.5: Zusammenhang zwischen durchschnittlicher Tageslichtsumme an den letzten drei Versuchstagen vor Probenahme und Polyphenolgehalt [mg/ 100 g FM] im Gewächshaus; Quadrate: „GwH13“, Kreise: „GwH14“, Rauten: „GwH14, nachts“, Dreiecke: „GwH14, 24h“; Regressionsgerade mit Regressionskoeffizienten (R^2) und Formel bezieht sich auf die Kontrollen (grau)

Neben der Beeinflussung durch Tageslichtsumme und Temperatur bewirkten auch zusätzliche Bestrahlungen mit **LEDs** Veränderungen der Polyphenolgehalte im Gewächshaus. Bei LED-Bestrahlungen zusätzlich zum Tageslicht in den Versuchsreihen „GwH13“ und „GwH14“ wurden tendenziell geringere Gehalte bei allen LED-Varianten gemessen, signifikant in der Versuchsreihe „GwH14“ bei einer zusätzlichen Bestrahlung mit grünen LEDs. In der Versuchsreihe „GwH14, nachts“ gab es kaum Unterschiede. Eine ganztägige Bestrahlung mit blauen LEDs („GwH14, 24h“) bewirkte eine signifikante Erhöhung des Polyphenolgehaltes.

Tabelle 5.12: Beeinflussung des Polyphenolgehalts [mg 100 g⁻¹ FM] von *P. odorata* durch eine Zusatzbestrahlung mit LEDs (B=Blau, G=Grün, R=Rot): kultiviert im Gewächshaus mit natürlichen Licht; beschrieben werden die Gehalte in den LED-Varianten (NL+B, NL+G, NL+R) im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (NL)

Bedingungen *		VERSUCHSREIHE										
		„GwH13“		„GwH14“		„GwH14, nachts“		„GwH14, 24 h“				
TLS [mol m ² d ⁻¹]		29,46 ±12,50		41,64 ± 3,35		11,64 ± 6,02		29,16 ± 6,16				
TT [°C]		30,13 ± 3,88		23,82 ± 0,34		22,06 ± 1,12		21,24 ± 1,13				
Variante	POLYPHENOLGEHALTE**											
	mg/ 100 g		[%]		mg/ 100 g		[%]		mg/ 100 g		[%]	
	NL		1120,62 ±230,02		774,51 a ±41,72		400,70 ±31,40		564,23 b ±52,80			
	NL+B		761,22 ±107,98 -32,1		695,19 ab ±59,09 -10,2		405,55 ±66,56 +1,2		776,89 a ±93,98 +37,7			
	NL+G		750,22 ±69,34 -33,1		599,45 b ±29,71 -22,6		420,93 ±43,15 +5,1		576,32 b ±29,64 +2,1			
	NL+R		845,37 ±56,66 -24,6		660,68 ab ±28,63 -14,7		361,13 ±59,12 -9,9		624,15 b ±42,42 +10,6			

*Durchschnittliche Tageslichtsummen (TLS) und Tagestemperatur (TT) der Kontrolle, berechnet für die letzten drei Tage vor der Probenahme

**Angegeben sind Mittelwerte und Standardabweichungen; kursiv geschrieben: prozentuale Veränderungen im Vergleich zur Kontrolle; unterschiedliche Buchstaben bezeichnen signifikante Unterschiede innerhalb einer Versuchsreihe zwischen Behandlungen, fehlende Buchstaben bedeuten keine signifikanten Unterschiede (Tukey-test, P≤0.05), n=4

Tabelle 5.13: Beeinflussung des Polyphenolgehalts [mg 100 g⁻¹ FM] von *P. odorata* durch eine Überdeckung mit photoselktiven Folien: nach drei Wochen, kultiviert in der Klimakammer (Versuchsjahr 2013) unter kontrollierten Bedingungen; beschrieben werden die Gehalte in den Folien-Varianten im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle

Lichtvariante*	LICHTBEDINGUNGEN		POLYPHENOLGEHALT***	
	PAR-Wert [μmol m ⁻² s ⁻¹]**	Tageslichtsumme [mol m ⁻² d ⁻¹]**	[mg 100 g ⁻¹ FM]	% Veränderungen gegenüber Kontrolle
FLh1	113,1	6,51	1215,70 ±95,65	
HMG72%	81,43	4,69	1391,50 ±221,71	+14,46
FLp1	81,17	4,68	1416,35 ±131,17	
PL57%	46,27	2,67	1594,93 ±187,80	+12,61
FLh2	190,06	10,95	865,58 ^a ±99,89	
HMG55%	104,53	6,02	628,21 ^b ±24,74	-27,49
FLp2	157,31	9,06	785,09 ^a ±143,56	
PL40%	62,92	3,62	525,12 ^b ±22,84	-35,22

* FL+HMG72%= Überdeckung der Pflanzen mit der Half Minus Green-Folie, erreichte Lichtintensität: 72% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLh1), FL+PL57%= Überdeckung der Pflanzen mit der Pale Lavander-Folie, erreichte Lichtintensität: 57% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLp1), FL+HMG55%= Überdeckung der Pflanzen mit der Half Minus Green-Folie, erreichte Lichtintensität: 55% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLh2), FL+PL40%= Überdeckung der Pflanzen mit der Pale Lavander-Folie, erreichte Lichtintensität: 40% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLp2),

** Zu Beginn des Versuchszeitraums

*** Angegeben sind Mittelwerte und Standardabweichungen; unterschiedliche Buchstaben bezeichnen signifikante Unterschiede zwischen Folien-Variante und zugehöriger Kontrolle, fehlende Buchstaben bedeuten keine signifikanten Unterschiede (Tukey-test, P≤0.05), n=4

Die Versuche mit Überdeckung der Pflanzen durch **photoselktive Folien** in der **Klimakammer** (Tabelle 5.13) deuten einen positiven Einfluss der Tageslichtsumme an. Unter beiden Folien bewirkte die jeweils geringere Lichtintensität („PL40%“, „HMG55%“) signifikante Verringerungen des Gehalts gegenüber der Kontrolle. Die jeweils höheren Lichtintensitäten („PL57%“, „HMG72%“) führten tendenziell zu Gehaltssteigerungen. Der Vergleich der Kontrollen ist weniger eindeutig, wodurch keine Aussage im Hinblick auf die Beeinflussung des Polyphenolgehalts durch die Tageslichtsumme abgeleitet werden

kann. Auch eine Beeinflussung durch die spektrale Lichtzusammensetzung ist nicht eindeutig erkennbar. Eine vergleichbare Reduktion der Tageslichtsumme durch die Varianten PL57% und HMG55% führte zwar zu einer unterschiedlichen Beeinflussung des Polyphenolgehalts, jedoch zeigt ein Vergleich der Varianten HMG72% und FLp1 keinen Unterschied bei vergleichbaren Tageslichtsummen.

Die **Folienversuche** im Gewächshaus zeigen in beiden Versuchsreihen die höchsten Polyphenolgehalte bei den Kontrollen (Tabelle 5.14), wobei dieser in der Versuchsreihe „GwH14“ signifikant höher war als in der Variante NL-PL.

Tabelle 5.14: Beeinflussung des Polyphenolgehalts [mg 100 g⁻¹ FM] von *P. odorata* durch eine Überdeckung mit photoselektiven Folien (HMG=Half Minus Green, PL=Pale Lavander): nach drei Wochen, kultiviert im Gewächshaus mit natürlichen Licht; beschrieben werden die Gehalte in den LED-Varianten (NL+B, NL+G, NL+R) im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (NL)

Bedingungen*	VERSUCHSREIHE			
	„GwH13“		„GwH14“	
	TLS [mol m ⁻² d ⁻¹]			
	29,46 ±12,50		41,64 ± 3,35	
	TT [°C]		23,82 ± 0,34	
Variante	POLYPHENOLGEHALTE**			
	mg/ 100 g		mg/ 100 g	
	[%]		[%]	
NL	1120,62 ±230,02		774,51 ^a ±41,72	
NL+HMG	910,59 ±98,42	-18,7	618,29 ^{ab} ±69,14	-20,2
NL+PL	847,92 ±76,96	-24,3	603,11 ^b ±79,44	-22,1

*Durchschnittliche Tageslichtsummen (TLS) und Tagestemperatur (TT) der Kontrolle, berechnet für die letzten drei Tage vor der Probenahme

**Angegeben sind Mittelwerte und Standardabweichungen; kursiv geschrieben: prozentuale Veränderungen im Vergleich zur Kontrolle; unterschiedliche Buchstaben bezeichnen signifikante Unterschiede innerhalb einer Versuchsreihe zwischen Behandlungen, fehlende Buchstaben bedeuten keine signifikanten Unterschiede (Tukey-test, P≤0.05), n=4

Unter Berücksichtigung aller Versuche in der Klimakammer deutet sich ein tendenziell negativer Zusammenhang zwischen Polyphenolgehalt und Tageslichtsumme an (Abbildung 5.6), jedoch ist der zugehörige Regressionskoeffizient sehr gering. Starke Unterschiede zwischen den Varianten gab es bei Tageslichtsummen bis ca. 7 mol m⁻²d⁻¹. Bei Tageslichtsummen über diesen Wert hinaus zeigten sich kaum Unterschiede. Aufgrund unterschiedlicher Ergebnisse bei den Versuchen mit photoselektiven Folien und hohen Streuungen bei den LED-Varianten ist es nicht möglich, aus den Ergebnissen der Klimakammerversuche eine Aussage bezüglich des Einflusses der spektralen Lichtzusammensetzung auf den Polyphenolgehalt abzuleiten.

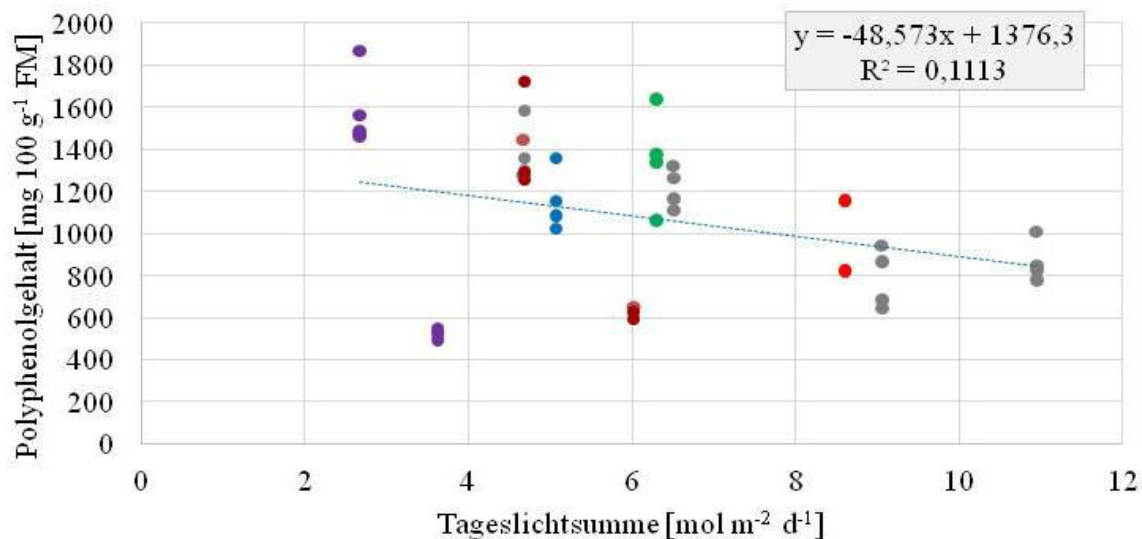


Abbildung 5.6: Zusammenhang zwischen Tageslichtsumme und dem Polyphenolgehalt in der Klimakammer; Unterschiede der Lichtzusammensetzung nicht berücksichtigt. Dargestellt sind Mittelwerte der einzelnen Varianten (n=4); grau: FL, blau: FL+B, grün: FL+G, rot: FL+R, lila: FL+PL, dunkelrot: FL+HMG; Regressionsgerade mit Regressionskoeffizienten (R^2) und Formel bezieht sich auf die Kontrollen (grau)

Die Korrelationskoeffizienten (Tabelle 5.15) bestätigen die Beobachtungen der Klimakammerversuche (Abbildung 5.6). Obgleich für einzelne Versuchsreihen signifikante Zusammenhänge für die Tageslichtsumme und den Polyphenolgehalt berechnet wurden, lässt sich aufgrund der großen Unterschiede keine Tendenz ableiten. Ähnlich ist dies im Hinblick auf die spektrale Lichtzusammensetzung. Der gemittelte Korrelationskoeffizient suggeriert einen positiven Zusammenhang mit dem kurzwelligen Blaulichtanteil, obgleich dieser nicht in allen Versuchsreihen beobachtet wurde. Die unterschiedlichen Reaktionen auf die Lichtmodifikationen implizieren möglicherweise Wechselwirkungen zwischen Tageslichtsumme und Lichtspektrum oder den Lichtbedingungen und anderen Wachstumsfaktoren.

Tabelle 5.15: Zusammenhang zwischen Lichteigenschaften und dem Polyphenolgehalt in *P. odorata*, kultiviert in der Klimakammer bzw. im Gewächshaus mit Lichtmodifikationen durch zusätzliche LED-Beleuchtung oder photosensitive Folien; angegeben sind partielle Korrelationskoeffizienten nach Spearman (LED-Versuche im Gewächshaus) bzw. nach Pearson (LED-Versuche in der Klimakammer; Folien-Versuche in der Klimakammer und im Gewächshaus)

		Korrelationskoeffizienten											
		TLS*	Spektralbereichsanteile						Verhältnisse				
			401-450	451-500	501-550	551-600	601-650	651-700	B:R	BR:G	B:G	R:G	R:FR
LED	KK13	-0,68	-0,19	0,02	-0,11	-0,07	-0,12	-0,18	-0,47	-0,34	-0,40	-0,10	
	GwH13	-0,29	0,43	-0,08	-0,25	0,22	0,13	-0,03	-0,54	0,58	0,27	0,70	
	GwH14	-0,29	0,21	-0,44	-0,54	0,65	-0,59	-0,54	0,63	0,16	0,48	-0,25	
	GwH14, nachts	-0,30	-0,16	-0,05	-0,02	-0,55	-0,18	0,54	0,46	-0,17	0,14	-0,46	
	GwH14, 24h	0,51	0,84	0,09	-0,62	-0,33	0,42	-0,05	-0,21	0,64	0,69	0,77	
Folie	KK13	-0,38	-0,09	-0,04	0,04	-0,07	0,02	0,02	-0,07	-0,43	-0,43	-0,50	0,39
	GwH13	0,63	0,92	-0,39	-0,34	-0,19	0,59	-0,09	0,28	0,31	0,32	-0,25	-0,27
	GwH14	0,72	0,28	0,18	0,40	-0,46	-0,49	-0,29	0,53	0,53	0,51	-0,52	-0,51
	Ø	0,01	0,39	-0,09	-0,20	-0,10	0,10	-0,08	0,09	0,19	0,22	-0,01	-0,14

Fett geschrieben: signifikant ($P \leq 0,05$)

*TLS=Tageslichtsumme

Für die Diskussion der Ergebnisse sind Hintergrundkenntnisse bezüglich der verwendeten Analyse- methode relevant, insbesondere aufgrund der hohen Anzahl an Verbindungen, die zusammengefasst be- stimmt wurden. Um die Ergebnisse deuten oder möglicherweise erklären zu können, wird zunächst die Methodik hinterfragt. Die Bestimmung der Gesamtphenole mit dem Folin-Ciocalteu-Reagenz ist eine weitverbreitete und etablierte **Method**. Dabei werden die reduzierenden Substanzen in einer Probe be- stimmt (SINGLETON et al., 1999). Folglich ist die bestimmte Polyphenolmenge abhängig von der Anzahl an reaktiven Gruppen, insbesondere freier phenolischer Hydroxylgruppen. Polyphenole mit wenigen reaktiven Gruppen werden folglich unterbewertet, zu denen viele Phenolsäuren, aber auch Flavonoide mit wenigen reaktiven Gruppen zählen. Zudem können andere reduzierende Substanzen interferieren, unter anderem Ascorbinsäure und Dehydroascorbinsäure (SÁNCHEZ-RANGEL et al., 2013; SINGLETON et al., 1999). Deswegen wird vereinzelt empfohlen, die Folin-Ciocalteu-Methode als Messung der ge- samten antioxidativen Kapazität zu betrachten und als grobe Abschätzung des Polyphenolgehalts, da Polyphenole in den meisten Pflanzen die dominierenden Antioxidanten darstellen (EVERETTE et al., 2010; WALKER et al., 2010).

Anhand der Korrelationskoeffizienten (Tabelle 5.15) lassen sich zwei verschiedene Reaktionen von *P. odorata* auf die Lichtmodifikationen beobachten. Deutlich negative Zusammenhänge gab es zwischen den Polyphenolgehalten in den Kontrollen der Klimakammerversuche und den Tageslichtsummen un- terhalb einer Tageslichtsumme von $7 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, ebenso wie tendenziell negative Zusammenhänge in den LED-Versuchen der Versuchsreihen „GwH13“, „GwH14“ und „GwH14, nachts“ im Gewächs- haus. Eine Beeinflussung durch die spektrale Lichtzusammensetzung kann bei diesen Versuchsreihen nicht abgeleitet werden. Im Gegensatz dazu wurde für die Folienversuche im Gewächshaus, die Ver- suchsreihe „GwH14, 24h“ und für den Vergleich der Kontrollen des Versuchsjahres 2014 im Gewächs- haus ein positiver Zusammenhang zwischen Polyphenolgehalt und Tageslichtsumme bestimmt. In die- sen Versuchsreihen war zudem eine positive Beeinflussung durch den kurzwelligen Blaulichtanteil zu erkennen.

Aufgrund der Funktionen der Polyphenole in der Pflanze sowie den Ergebnissen diverser Studien wurde ein positiver Zusammenhang zwischen der **Lichtintensität** und dem Polyphenolgehalt erwartet (AWAD et al., 2001; FORREST, 1969; LEYVA et al., 1995; PAGE et al., 2012; SHOJI et al., 2011; TAKEDA, 1990; TATTINI et al., 2004; VANDERAUWERA et al., 2005). Begründet wird dies durch eine Verstärkung des Photonenflusses bei hohen Lichtintensitäten mit einem resultierenden Anstieg des Bedarfs an antioxi- dativ wirksamen Inhaltsstoffen (LEYVA et al., 1995) sowie der Regulation von Genen (SCHWINN et al., 2016) und Enzymen (CREASY, 1968; SHOJI et al., 2011; TAKEDA, 1990; VANDERAUWERA et al., 2005). Zudem bedeuten höhere Lichtintensitäten eine Steigerung der Photosynthese und dadurch eine absolute Erhöhung der Gehalte an reaktiven Sauerstoffspezies (CAKMAK, 2005). Diesen wird eine direkte, oder über Reaktionsprodukte indirekte, Förderung der Synthese von Polyphenolen zugeschrieben (HUNG et al., 2008; LEYVA et al., 1995; ŚWIECA, 2016; ZHANG et al., 2014a), die jedoch nicht unbestritten ist (PASCHOLATI et al., 1986; ROUBELAKIS-ANGELAKIS und KLIEWER, 1986).

Dennoch wurde bei einigen Versuchsreihen ein negativer Korrelationskoeffizient für den Zusammenhang zwischen Tageslichtsumme und Polyphenolgehalt berechnet. Diesbezüglich gibt es kaum Studien mit vergleichbaren Ergebnissen. Unerwartete Steigerungen des Polyphenolgehalts bei sinkenden Lichtintensitäten wurden von IBRAHIM et al. (2014) durch erhöhte Verfügbarkeiten an löslichen Kohlenhydraten als Ausgangsstoff des Phenylpropanoidweges erklärt. Während IBRAHIM et al. (2014) entsprechende Korrelationen berechneten, deuten andere Studien an, dass die Verfügbarkeit löslicher Kohlenhydrate durch höhere Lichtintensitäten steigt (LICHTENTHALER et al., 1981). In den Gewächshausversuchen können die negativen Korrelationskoeffizienten für den Zusammenhang zwischen Polyphenolgehalt und Tageslichtsumme auf einer reduzierenden Wirkung einer zusätzlichen LED-Bestrahlung beruhen. Bei den **blauen LEDs** ist dies überraschend, da diese durch eine Anregung von Blaulichtphotorezeptoren erwartungsgemäß eine Steigerung des Polyphenolgehalts bewirken sollten. Es ist zwar bekannt, dass blaues Licht auf einige phenolische Inhaltsstoffe bestimmter Spezies keinen oder nur einen geringfügigen Einfluss hat. Dennoch ist nicht davon auszugehen, dass es durch das zusätzliche Licht zu einer Reduktion der Inhaltsstoffgehalte gekommen ist. Möglich ist, dass die zusätzliche Bestrahlung vorwiegend für die Photosynthese genutzt wurde. Dies bedeutet zugleich eine vermehrte Bildung reaktiver Sauerstoffspezies, wodurch der Bedarf an antioxidativ wirksamen Substanzen steigt, diese aber möglicherweise nicht mit der gleichen Geschwindigkeit gebildet wurden. Es ist nicht bekannt, mit welchen Geschwindigkeiten der Aufbau von Biomasse und die Bildung von Polyphenolen geschieht. Es wäre allerdings zu prüfen, ob es bei organischen Inhaltsstoffen einen sogenannten „Verdünnungseffekt“ gibt. Dieser wurde für anorganische Inhaltsstoffe beschrieben (siehe Abschnitt 5.1.7). Dies würde bedeuten, dass der Aufbau von Blattmasse schneller erfolgte als die Synthese von Polyphenolen mit hohen antioxidativen Eigenschaften und dadurch deren Konzentration in der Blattmasse entsprechend abnahm.

Zugleich wurden in den Versuchsreihen „GwH13“ und „GwH14“ die Flavonoid- und Anthocyangehalte durch die LEDs nicht signifikant verändert (Tabelle 5.22, Tabelle 5.26). Dadurch wird angedeutet, dass nicht die Gehalte der Verbindungen verändert wurden, sondern der Hydroxilierungsgrad, welcher wichtig ist bei der Bestimmung der Gesamtpolyphenole, jedoch nicht für die Flavonoide und Anthocyane.

In einigen Versuchsreihen wurden positive Korrelationen mit dem kurzwelligen **Blaulicht**anteil berechnet. Dies ist ein Indiz dafür, dass die Polyphenolsynthese nicht (ausschließlich) wellenlängenunabhängig gefördert wurde, sondern möglicherweise auch photorezeptorvermittelt. Dafür spricht insbesondere der gesteigerte Polyphenolgehalt durch blaue LEDs in der Versuchsreihe „GwH14, 24h“, da das Emissionsmaximum der blauen LEDs mit 443 nm (Abbildung 4.14) im Bereich der Absorptionsspektren von Cryptochromen und Phototropinen (Abbildung 2.15) liegt. Die Blaulichtphotorezeptoren werden mit einer gesteigerten Polyphenolsynthese assoziiert (DUTTA GUPTA und KARMAKAR, 2017; EBISAWA et al., 2008; KIM et al., 2013, 2015; MANIVANNAN et al., 2015; SHIGA et al., 2009; SHOJI et al., 2011; STUTTE et al., 2009; TAULAVUORI et al., 2016). Somit würden die vorliegenden Ergebnisse Beobachtungen bei anderen Spezies bestätigen. Zudem könnte eine Involvierung von Blaulichtphotorezeptoren bei der Polyphenolakkumulation auch die höheren Polyphenolgehalte in der Klimakammer erklären.

Die verwendeten Leuchtstoffröhren emittierten im Blaulichtbereich mit einem Maximum bei 435 nm im Absorptionsbereich der Cryptochrome und Phototropine (Abbildung 2.15). Möglicherweise wurden dadurch die blaulichtphotorezeptorvermittelten Prozesse stärker angeregt als durch das Breitbandspektrum des Sonnenlichts im Gewächshaus.

Für die unterschiedlichen Beobachtungen bezüglich einer zusätzlichen Bestrahlung mit blauen LEDs war möglicherweise der Tageszeitraum relevant, während dem die zusätzliche LED-Bestrahlung stattfand. Untersuchungen mit *Lactuca sativa* deuten darauf hin, dass bei einer Erhöhung des Polyphenolgehalts durch eine nächtliche Bestrahlung mit blauen LEDs insbesondere die letzten zwei Stunden vor Sonnenaufgang entscheidend sind (OUZOUNIS et al., 2015). Dieser Zeitraum wurde durch die ganztägige Bestrahlung abgedeckt (Tabelle 4.5), durch die nächtliche Bestrahlung (GwH14, nachts) hingegen nur teilweise. Aufgrund der Versuchszeiträume im Juni bzw. Juli mit einem Sonnenaufgang um fünf Uhr fand in den Versuchsreihen „GwH13“ und „GwH14“ keine LED-Bestrahlung in den letzten zwei Stunden vor Sonnenaufgang statt. Für eine effiziente Anwendung von LEDs im Gartenbau wäre dies zu überprüfen, da gegebenenfalls die Bestrahlungsdauer mit LEDs verkürzt und angepasst werden könnte.

Im Gegensatz zu der blauen Zusatzbestrahlung hatten **rote LEDs** in den Gewächshausversuchen wider Erwarten keine positive Wirkung auf den Polyphenolgehalt. Auch in der Klimakammer wird der positive Effekt durch die unterschiedlichen Tageslichtsummen relativiert (Abbildung 5.6). Eventuell kann dies erklärt werden durch Diskrepanzen zwischen dem Emissionsspektrum roter LEDs (Maximum bei 629 nm, Abbildung 4.14) und den Absorptionsmaxima der Phytochrome bei 660 nm (inaktive Phytochrome) bzw. 730 nm (aktive Phytochrome) (LI et al., 2011a). Da Photorezeptoren nur in einem bestimmten Bereich absorbieren (EICHENBERG et al., 2000; SHINOMURA et al., 1996), wurde die emittierte Strahlung möglicherweise nicht (optimal) von den Phytochromen absorbiert, wodurch die Polyphenolsynthese nicht bzw. nur in einem geringen Maße gefördert wurde. Dafür sprechen insbesondere die Gewächshausversuche mit roten LEDs (Tabelle 5.12). Dass in den Klimakammerversuchen dennoch eine tendenzielle Steigerung des Polyphenolgehalts durch rote LEDs beobachtet wurde, kann daran liegen, dass das Emissionsspektrum der LEDs sich zwar nicht mit dem Absorptionsmaximum der Phytochrome deckte, jedoch näher an diesem lag als die entsprechende Emissionsbande der Leuchtstoffröhren (Abbildung 4.16). Somit wurden die Phytochrome bei einer zusätzlichen Bestrahlung mit roten LEDs möglicherweise stärker angeregt als durch das Lichtspektrum der Leuchtstoffröhren. Insgesamt könnte das, nicht auf Phytochrome abgestimmte, Emissionsspektrum der verwendeten LEDs erklären, warum die, in der Literatur beschriebene, positive Beeinflussung der Polyphenolsynthese durch den roten Spektralbereich (ATTRIDGE und SMITH, 1967; BEGGS et al., 1987; JEONG et al., 2012; KIM et al., 2015; LANGE et al., 1971; MANIVANNAN et al., 2015; MOHR und DRUMM-HERREL, 1983; SHIGA et al., 2009; SHOJI et al., 2011) durch die Untersuchungen im Rahmen der Promotion nicht bestätigt wurde.

In der Klimakammer wurde der Polyphenolgehalt positiv durch **grüne LEDs** beeinflusst. Im Hinblick auf den Einfluss grüner Spektralbereiche liegen nur wenige Studien vor. In Erdbeeren wurde eine Aktivitätserhöhung der PAL durch grünes Licht, vergleichbar mit der Wirkung von weißem Licht, gemessen

(CREASY, 1968). Auch in Tomatenblättern wurden die Polyphenolgehalte durch Bestrahlung mit grünen LEDs ähnlich beeinflusst wie durch weißes Licht (KIM et al., 2013). Eine mutmaßliche Beteiligung von Cryptochromen an der Polyphenolsynthese (AHMAD et al., 1995; FUGLEVAND, 1996; WADE et al., 2001) könnte einen positiven Effekt einer grünen Zusatzbestrahlung erklären. Da grüne LEDs auch die Anthocyangehalte positiv beeinflussten, wird eine mögliche Beeinflussung der Synthese sekundärer Pflanzeninhaltsstoffe durch grünes Licht im Abschnitt 5.1.6 detaillierter besprochen. Eine stärkere, positive Beeinflussung des Polyphenolgehalts durch grüne LEDs in der Klimakammer im Vergleich zum Gewächshaus könnte mit dem Emissionsspektrum der Grundbelichtung zusammenhängen. In der Klimakammer lag die Emissionsbande der Leuchtstoffröhren im grünen Bereich bei 545 nm, wodurch die grünen LEDs eine deutliche Verstärkung des kurzwelligen Grünlichtanteil bedeuteten (Abbildung 4.16). Im Gewächshaus war der Effekt grüner LEDs durch das ausgeglichene Emissionsspektrum des Sonnenlichtes PAR-Wert-abhängig möglicherweise wirkungslos (Abbildung 4.18).

Neben einer Modifizierung des sichtbaren Lichtes bewirkten die verwendeten Folien im Gewächshaus eine Reduktion der **ultravioletten Strahlung** (siehe Anhang 3), wodurch nach Herstellerangaben ein Ausbleichen der Folien verhindert werden soll. UV-Licht wurde in anderen Studien mit einer gesteigerten Synthese von Substanzen mit starken antioxidativen Eigenschaften in Verbindung gebracht (BIEZA und LOIS, 2001; FUGLEVAND, 1996; KOES et al., 1989; KOLB et al., 2001; KOYAMA et al., 2012; WADE et al., 2001; WELLMANN et al., 1976), sowie einer Erhöhung der antioxidativen Eigenschaften der Moleküle durch Förderungen von Hydroxylierungen (RYAN et al., 2002, 2001). Die Transparenz der PL-Folie für UV-Strahlung war mit durchschnittlich 63% etwas höher als die der HMG-Folie mit 53%. Neben dem mutmaßlichen positiven Zusammenhang des Polyphenolgehalts mit der Tageslichtsumme kann die Reduktion der UV-Strahlung durch die Folien eine weitere Begründung für die Abnahme der Polyphenolgehalte sein. Zudem könnte dies erklären, warum die Unterschiede zwischen HMG- und PL-Folie gering ausfielen, obgleich die HMG-Folie 24% mehr photosynthetisch aktive Strahlung durchließ.

Die Ergebnisse waren teilweise unerwartet und widersprachen den Erwartungen. Dies kann verschiedene Gründe haben, u.a. eine fehlende Übereinstimmung zwischen Emissionsbanden der LEDs und Absorptionsspektren der Photorezeptoren, Wechselwirkungen mit anderen Kultivierungsbedingungen und die Messmethodik. Zumindest wird angedeutet, dass zusätzliche Bestrahlungen mit LEDs einen deutlich stärkeren positiven Effekt bei niedrigen PAR-Werten der Grundbelichtung haben. Die ernährungsphysiologische Bedeutung der Gehaltsveränderungen ist aufgrund fehlender Referenzwerte für die Polyphenolaufnahme schwierig abzuschätzen. Auf Grundlage einer durchschnittlichen Polyphenolaufnahmemenge von 800 mg bei Einhaltung der „5-a-day“-Regel³, würde bei einem durchschnittlichen Polyphenolgehalt von 1070,68 mg 100 g⁻¹ FM bei Kultivierung in der Klimakammer der Verzehr von

³ Für Polyphenole liegt derzeit keine Aufnahmeempfehlung vor. Die angegebenen Werte beziehen sich auf eine Studie von WILLIAMSON und HOLST (2008), die eine durchschnittliche Polyphenolaufnahmemenge berechneten anhand der „5-a-day“-Regel (5 Portionen Obst und Gemüse am Tag) (siehe Abschnitt 2.4.2.3)

75 g *P. odorata* ausreichen, bei einem durchschnittlichen Polyphenolgehalt von 715,02 mg 100 g⁻¹ FM bei Kultivierung im Gewächshaus 89 g. Die höchsten Gehaltssteigerungen wurden in der Klimakammer durch eine Zusatzbestrahlung mit roten LEDs beobachtet, wodurch die erforderliche Verzehrsmenge um 25,9% auf 56 g sinken würde (siehe Anhang, Tabelle 12.31).

5.1.4 Antioxidative Kapazität

Aufgrund verschiedener Bestimmungsmethoden gibt es kaum Studien, die für einen Vergleich der vorliegenden TEAC-Werte herangezogen werden können. Durch AREEKUL und PHOMKAIVON (2015) wurde eine antioxidative Kapazität eines Ethanol-Extraktes von *P. odorata*, unter Verwendung der ABTS-Methode, von 385,40 mg 100 g⁻¹ FM bestimmt. In der vorliegenden Arbeit gab es eine hohe Spannweite in den Kontrollen, mit Werten von 370 mg TEAC 100 g⁻¹ FM bis 3391 mg TEAC 100 g⁻¹ FM. Neben Unterschieden bei der Messmethodik und einer möglichen Beeinflussung durch die Lichtbedingungen, können auch das Wachstumsstadium, Temperatur und andere Umweltfaktoren die Ergebnisse beeinflusst haben (HOWARD et al., 2002), sodass ein direkter Vergleich schwierig ist.

In der **Klimakammer** waren die Schwankungen der bestimmten antioxidativen Kapazität mit einer Spannweite von 1151,10- 3301,80 mg TEAC 100 g⁻¹ FM in den Kontrollen (Tabelle 5.16, Tabelle 5.18) deutlich größer als im Gewächshaus. Die geringsten antioxidativen Kapazitäten wurden bei der Kontrolle FLr bestimmt, welche zugleich die höchste Tageslichtsumme aufwies. Grüne **LEDs** bewirkten eine signifikante Erhöhung der antioxidativen Kapazität (Tabelle 5.16). Blaue und rote LEDs zeigten hingegen keinen Einfluss.

Tabelle 5.16: Beeinflussung antioxidativen Kapazität [mg TEAC 100 g⁻¹ FM] von *P. odorata* durch eine Zusatzbestrahlung mit LEDs: nach drei Wochen, kultiviert in der Klimakammer (Versuchsjahr 2013) unter kontrollierten Bedingungen; beschrieben werden die Gehalte in den LED-Varianten im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle

Lichtvariante*	LICHTBEDINGUNGEN		ANTIOXIDATIVE KAPAZITÄT ***	
	PAR-Wert [μmol m ⁻² s ⁻¹]**	Tageslichtsumme [mol m ⁻² d ⁻¹]**	[mg 100 g ⁻¹ FM]	% Veränderungen gegenüber Kontrolle
FLb	81,17	4,68	1579,73 ±96,98	
FL+B	87,96	5,07	1562,50 ±63,15	-1,1
FLg	113,1	6,51	1690,01 ^b ±153,56	
FL+G	109,35	6,30	2275,83 ^a ±233,84	+34,7
FLr	157,31	9,06	1151,10 ±37,83	
FL+R	149,50	8,61	1207,81 ±79,02	+4,9

*FL+R= Ergänzung der Grundbelichtung durch rote LEDs (zugehörige Kontrolle: FLr), FL+G= Ergänzung der Grundbelichtung durch grüne LEDs (zugehörige Kontrolle: FLg), FL+B= Ergänzung der Grundbelichtung durch blaue LEDs (zugehörige Kontrolle: FLb)

**Zu Beginn des Versuchszeitraums

***Angabe sind Mittelwerte und Standardabweichungen; unterschiedliche Buchstaben bezeichnen signifikante Unterschiede zwischen LED-Variante und zugehöriger Kontrolle, fehlende Buchstaben bedeuten keine signifikanten Unterschiede (Tukey-test, P≤0.05), n=4

Deutlich geringer im Vergleich zur Klimakammer (Tabelle 5.16) waren die bestimmten Werte im Gewächshaus (Tabelle 5.17). Die Schwankungen in den Kontrollen zwischen den Versuchsreihen waren

ebenfalls vergleichsweise gering (370,47-1016,48 mg 100 g⁻¹ FM), vor allem bei den Versuchen des Jahres 2014. Die letzten drei Tage vor der Probenahme betrachtet, können die Unterschiede zwischen den Versuchsreihen nicht auf unterschiedliche Tageslichtsummen zurückgeführt werden ($R^2=0,02$, nicht signifikant). Die multiplen Korrelationskoeffizienten (siehe Anhang, Tabelle 12.24) deuten hingegen Wechselwirkungen zwischen Tageslichtsumme, Tages- und Nachttemperatur an, da diese Kombination die Varianz zwischen den Versuchsreihen am besten erklärt ($R^2=0,82$). Steigende Temperaturen korrelierten dabei positiv mit der antioxidativen Kapazität (Abbildung 5.8).

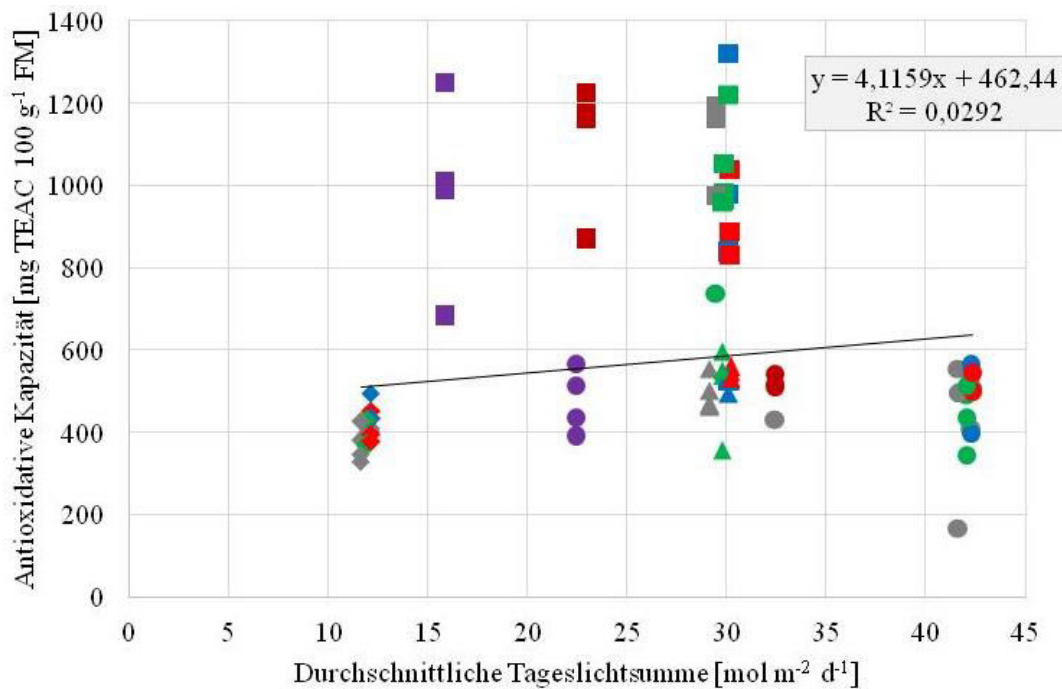


Abbildung 5.7: Zusammenhang zwischen durchschnittlicher Tageslichtsumme an den letzten drei Versuchstagen vor Probenahme und antioxidativer Kapazität [mg TEAC/ 100 g FM] im Gewächshaus; Quadrate: „GwH13“, Kreise: „GwH14“, Rauten: „GwH14, nachts“, Dreiecke: „GwH14, 24h“; Regressionsgerade mit Regressionskoeffizienten (R^2) und Formel bezieht sich auf die Kontrollen (grau)

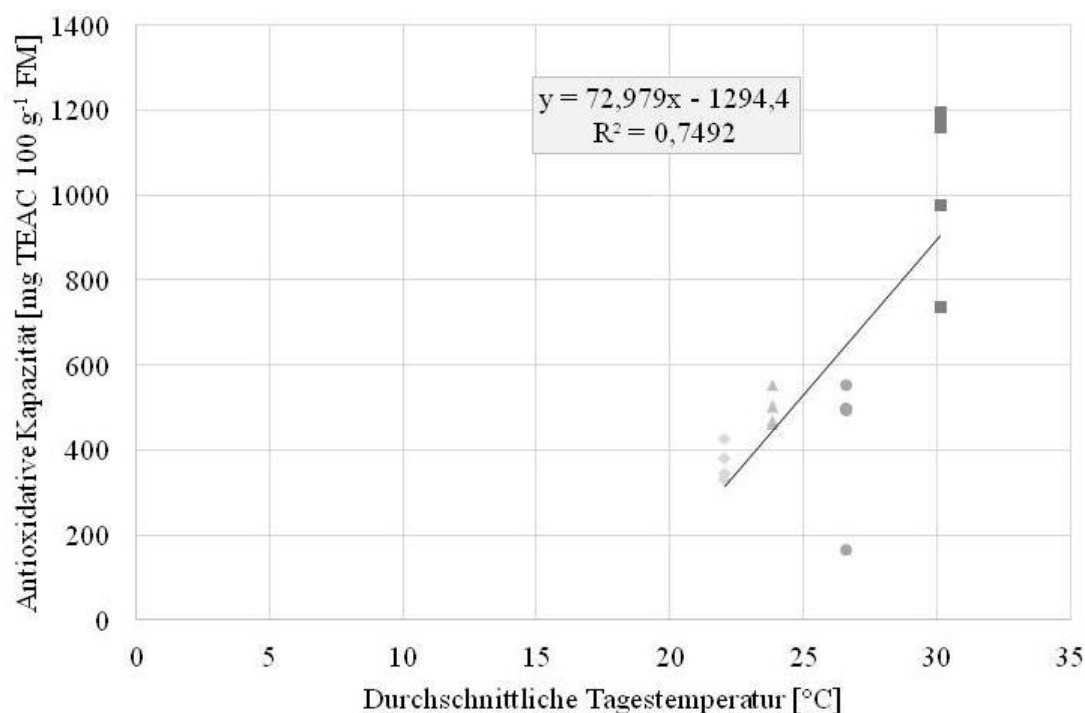


Abbildung 5.8: Zusammenhang zwischen durchschnittlicher Tagestemperatur an den letzten drei Versuchstagen vor Probenahme und antioxidativer Kapazität [mg TEAC/ 100 g FM] im Gewächshaus; Quadrate: „GwH13“, Kreise: „GwH14“, Rauten: „GwH14, nachts“, Dreiecke: „GwH14, 24h“; Regressionsgerade mit Regressionskoeffizienten (R^2) und Formel bezieht sich auf die Kontrollen (grau)

Die antioxidative Kapazität wurde nicht signifikant durch zusätzliche **LED**-Bestrahlungen beeinflusst (Tabelle 5.17). In einzelnen Versuchsreihen kam es zu tendenziellen Veränderungen, eine hohe Streuung verhinderte jedoch das Berechnen von Signifikanzen.

Tabelle 5.17: Beeinflussung der antioxidativen Kapazität [mg TEAC 100 g⁻¹ FM] von *P. odorata* durch eine Zusatzbestrahlung mit LEDs (B=Blau, G=Grün, R=Rot): kultiviert im Gewächshaus mit natürlichem Licht; beschrieben werden die Gehalte in den LED-Varianten (NL+B, NL+G, NL+R) im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (NL)

Bedingungen*		VERSUCHSREIHE							
		„GwH13“		„GwH14“		„GwH14, nachts“		„GwH14, 24 h“	
TLS	[mol m ⁻² d ⁻¹]	29,46 ±12,50		41,64 ± 3,35		11,64 ± 6,02		29,16 ± 6,16	
TT	[°C]	30,13 ± 3,88		23,82 ± 0,34		22,06 ± 1,12		21,24 ± 1,13	
Variante	ANTIOXIDATIVE KAPAZITÄT**								
	mg/ 100 g		[%]	mg/ 100 g		[%]	mg/ 100 g		[%]
	NL	1016,48 ±209,80		427,06 ±176,42		370,47 ±43,44		496,32 ±41,88	
	NL+B	915,75 ±228,30	-9,91	476,43 ±86,31	+11,56	434,70 ±42,54	+17,34	528,15 ±22,89	+3,00
	NL+G	988,96 ±37,39	-2,71	445,93 ±75,16	-4,42	398,62 ±33,22	+7,60	511,11 ±105,14	+2,98
	NL+R	993,38 ±150,67	-2,27	513,17 ±46,68	+20,16	414,91 ±34,31	+12,00	541,42 ±15,03	+9,09

*Durchschnittliche Tageslichtsummen (TLS) und Tagestemperatur (TT) der Kontrolle, berechnet für die letzten drei Tage vor der Probenahme

**Angabe sind Mittelwerte und Standardabweichungen; kursiv geschrieben: prozentuale Veränderungen im Vergleich zur Kontrolle; unterschiedliche Buchstaben bezeichnen signifikante Unterschiede innerhalb einer Versuchsreihe zwischen Behandlungen, fehlende Buchstaben bedeuten keine signifikanten Unterschiede (Tukey-test, $P \leq 0.05$), $n=4$

Bei den Versuchen mit **photoselktiven Folien** in der **Klimakammer** zeigte sich ein negativer Zusammenhang zwischen Tageslichtsumme und antioxidativer Kapazität (Tabelle 5.18). Die Variante HMG72% bewirkte eine signifikante Steigerung der antioxidativen Kapazität, die Variante PL40% eine

signifikante Reduktion. Ein Vergleich der Beeinflussungen durch HMG55% und PL57% sowie ein direkter Vergleich des absoluten Wertes der Variante HMG55% und Kontrolle FLp1 lassen einen Einfluss der spektralen Lichtzusammensetzung vermuten.

Die Abbildung 5.9 fasst die Ergebnisse der Klimakammerversuche zusammen. Während die Korrelationskoeffizienten einen negativen Zusammenhang zwischen Tageslichtsumme und antioxidativer Kapazität andeuten, scheint es zwischen den Lichtvarianten FLh2, FLp2/FLr, FL+R und FLg keine relevanten Unterschiede zu geben. Dadurch kann abgeleitet werden, dass unter diesen Bedingungen ab einer Tageslichtsumme von $5 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ die antioxidative Kapazität nicht durch die Lichtbedingungen beeinflusst wurde. Bei geringeren Tageslichtsummen gab es hingegen deutliche Unterschiede zwischen den Varianten, wobei diese nicht (nur) auf unterschiedliche Tageslichtsummen zurückzuführen sind, sondern vermutlich auch auf den Modifikationen des Lichtspektrums beruhen. Bei vergleichbaren Tageslichtsummen hatte die Variante FL+G höhere Werte als FLg, die Variante HMG55% eine geringere antioxidative Kapazität. Ähnlich verhielt sich der Vergleich von HMG72% und FLb/FLp1.

Tabelle 5.18: Beeinflussung der Antioxidativen Kapazität [$\text{mg TEAC } 100 \text{ g}^{-1} \text{ FM}$] von *P. odorata* durch eine Überdeckung mit photoselektiven Folien: nach drei Wochen, kultiviert in der Klimakammer (Versuchsjahr 2013) unter kontrollierten Bedingungen; beschrieben werden die Gehalte in den Folien-Varianten im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle

Lichtvariante*	LICHTBEDINGUNGEN		ANTIOXIDATIVE KAPAZITÄT***	
	PAR-Wert [$\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$]**	Tageslichtsumme [$\text{mol m}^{-2}\text{d}^{-1}$]**	[$\text{mg } 100 \text{ g}^{-1} \text{ FM}$]	% Veränderungen gegenüber Kontrolle
FLh1	113,1	6,51	1690,01 _b $\pm 153,56$	
HMG72%	81,43	4,69	2045,55 _a $\pm 82,45$	+21,04
FLp1	81,17	4,68	3391,80 $\pm 548,76$	
PL57%	46,27	2,67	3976,81 $\pm 219,51$	+17,25
FLh2	190,06	10,95	1153,85 $\pm 54,45$	
HMG55%	104,53	6,02	1027,30 $\pm 95,60$	-10,97
FLp2	157,31	9,06	1151,10 _a $\pm 37,83$	
PL40%	62,92	3,62	933,77 _b $\pm 42,35$	-18,88

* FL+HMG72%= Überdeckung der Pflanzen mit der Half Minus Green-Folie, erreichte Lichtintensität: 72% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLh1), FL+PL57%= Überdeckung der Pflanzen mit der Pale Lavander-Folie, erreichte Lichtintensität: 57% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLp1), FL+HMG55%= Überdeckung der Pflanzen mit der Half Minus Green-Folie, erreichte Lichtintensität: 55% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLh2), FL+PL40%= Überdeckung der Pflanzen mit der Pale Lavander-Folie, erreichte Lichtintensität: 40% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLp2),

** Zu Beginn des Versuchszeitraums

*** Angegeben sind Mittelwerte und Standardabweichungen; unterschiedliche Buchstaben bezeichnen signifikante Unterschiede zwischen Folien-Variante und zugehöriger Kontrolle, fehlende Buchstaben bedeuten keine signifikanten Unterschiede (Tukey-test, $P \leq 0.05$), $n=4$

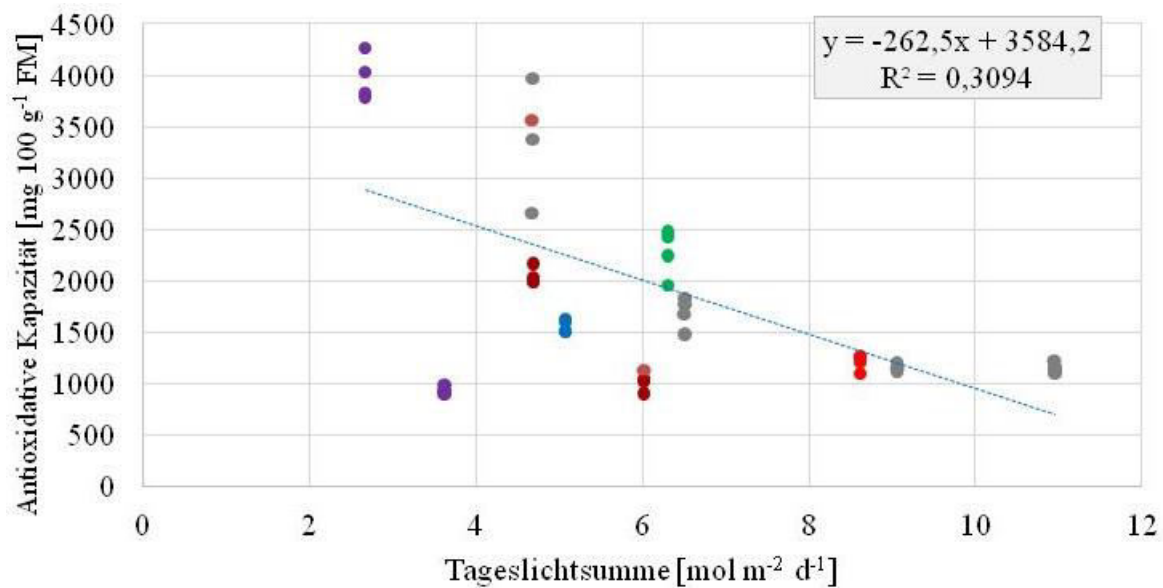


Abbildung 5.9: Zusammenhang zwischen Tageslichtsumme und antioxidativer Kapazität in der Klimakammer; Unterschiede der Lichtzusammensetzung nicht berücksichtigt. Dargestellt sind Mittelwerte der einzelnen Varianten (n=4); grau: FL, blau: FL+B, grün: FL+G, rot: FL+R, lila: FL+PL, dunkelrot: FL+HMG; Regressionsgerade mit Regressionskoeffizienten (R^2) und Formel bezieht sich auf die Kontrollen (grau)

In den **Gewächshaus**versuchen führte eine Überdeckung mit **photoselektiven Folien** zu keiner signifikanten Beeinflussung der antioxidativen Kapazität (Tabelle 5.19). Tendenziell wurde diese in der Versuchsreihe „GwH14“ durch die Nutzung der HMG-Folie etwas erhöht, jedoch verhinderte eine hohe Streuung die Berechnung signifikanter Unterschiede.

Tabelle 5.19: Beeinflussung der antioxidativen Kapazität [mg TEAC 100 g⁻¹ FM] von *P. odorata* durch eine Überdeckung mit photoselektiven Folien (HMG=Half Minus Green, PL=Pale Lavender): nach drei Wochen, kultiviert im Gewächshaus mit natürlichem Licht; beschrieben werden die Gehalte in den LED-Varianten (NL+B, NL+G, NL+R) im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (NL)

Varianten (NL+L, NL+P, NL+R) im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (NL)		VERSUCHSREIHE			
Bedingungen*		„GwH13“		„GwH14“	
	TLS [mol m ⁻² d ⁻¹]	29,46 ±12,50		41,64 ± 3,35	
	TT [°C]	30,13 ± 3,88		23,82 ± 0,34	
Variante		ANTIOXIDATIVE KAPAZITÄT**			
		mg/ 100 g	[%]	mg/ 100 g	[%]
	NL	1016,48 ±209,80		427,06 ±176,42	
	NL+HMG	1108,28 ±160,66	+9,0	499,61 ±47,56	+17,0
	NL+PL	983,19 ±231,76	-3,3	476,82 ±78,46	+11,7

*Durchschnittliche Tageslichtsummen (TLS) und Tagestemperatur (TT) der Kontrolle, berechnet für die letzten drei Tage vor der Probenahme

**Angabe sind Mittelwerte und Standardabweichungen; kursiv geschrieben: prozentuale Veränderungen im Vergleich zur Kontrolle; unterschiedliche Buchstaben bezeichnen signifikante Unterschiede innerhalb einer Versuchsreihe zwischen Behandlungen, fehlende Buchstaben bedeuten keine signifikanten Unterschiede (Tukey-test, $P \leq 0.05$), n=4

Die Korrelationskoeffizienten (Tabelle 5.20) zeigen für einzelne Versuchsreihen signifikante Zusammenhänge zwischen der Tageslichtsumme und der antioxidativen Kapazität. Der gemittelte Korrelationskoeffizient lässt aufgrund der großen Unterschiede jedoch keine Tendenz erkennen. Ähnlich war dies im Hinblick auf die spektrale Lichtzusammensetzung, die bei den einzelnen Versuchsreihen nur in

wenigen Fällen mit einzelnen Spektralbereichen oder Verhältnissen korrelierte und folglich insgesamt keinen tendenziellen Einfluss auf die antioxidative Kapazität zeigt.

Tabelle 5.20: Zusammenhang zwischen Lichteigenschaften und der antioxidativen Kapazität in *P. odorata*, kultiviert in der Klimakammer bzw. im Gewächshaus mit Lichtmodifikationen durch zusätzliche LED-Beleuchtung oder photoselektive Folien; angegeben sind partielle Korrelationskoeffizienten nach Spearman (LED-Versuche im Gewächshaus) bzw. nach Pearson (LED-Versuche in der Klimakammer; Folien-Versuche in der Klimakammer und im Gewächshaus)

		Korrelationskoeffizienten											
		TLS*	Spektralbereichsanteile						Verhältnisse				
			401-450	451-500	501-550	551-600	601-650	651-700	B:R	BR:G	B:G	R:G	R:FR
LED	KK13	-0,45	-0,53	0,63	-0,06	-0,28	-0,00	-0,04	-0,16	-0,40	-0,25	-0,51	
	GwH13	-0,02	0,23	-0,02	0,26	-0,17	0,08	-0,05	-0,23	-0,05	-0,09	0,16	
	GwH14	0,28	-0,08	0,17	-0,29	-0,42	0,17	0,34	-0,10	0,24	0,11	0,08	
	GwH14, nachts	0,60	0,71	0,04	0,66	0,56	0,24	-0,37	0,22	-0,26	0,28	-0,03	
	GwH14, 24h	0,21	-0,07	-0,06	0,18	-0,35	-0,06	0,07	-0,01	-0,14	-0,10	-0,22	
Folie	KK13	-0,56	0,03	0,03	0,14	-0,25	0,14	-0,13	0,17	-0,52	-0,27	-0,45	0,21
	GwH13	0,08	0,63	0,01	-0,43	0,12	0,01	-0,17	-0,27	-0,22	-0,28	0,31	0,28
	GwH14	-0,19	-0,52	0,15	0,44	-0,14	0,04	-0,18	-0,22	-0,28	-0,32	0,18	0,09
	Ø	-0,01	0,07	0,13	0,13	-0,11	0,08	-0,07	-0,08	-0,21	-0,12	-0,17	0,19

Fett geschrieben: signifikant ($P \leq 0,05$)

*TLS= Tageslichtsumme

Die unterschiedlichen Ergebnisse der einzelnen Versuchsreihen sind vermutlich auf die Vielzahl an Substanzen mit antioxidativen Eigenschaften zurückzuführen, welche in die Bestimmung eingegangen sind. Eine durchgeführte multiple Korrelationsanalyse mit dem Ziel, die Beteiligung der einzelnen Antioxidantiengruppen an der gesamten antioxidativen Kapazität zu klären, deutet einen geringen, jedoch signifikanten Einfluss von Carotinoiden und Ascorbinsäure an ($R^2=0,20$), welche teilweise vergleichbare TEAC-Werte erreichen können wie einige Polyphenole (MILLER und RICE-EVANS, 1997; SOFFERS et al., 1999; VAN DEN BERG et al., 1999). Unter Berücksichtigung aller drei Komponenten (Polyphenole, Carotinoide, Ascorbinsäure) liegt das multiple Bestimmtheitsmaß bei $R^2=0,80$. Dadurch kann abgeleitet werden, dass Polyphenole die dominierenden Antioxidantien sind und einen wichtigen Beitrag an der antioxidativen Kapazität haben, jedoch auch weitere gelöste antioxidativ wirksame Substanzen relevant sind (AL-DUAIS et al., 2009; AL-SAIKHAN et al., 1995; DEEPA et al., 2007; JACOBO-VELÁZQUEZ und CISNEROS-ZEVALLOS, 2009; SAMEE et al., 2006). Neben den genannten Carotinoiden und Ascorbinsäure werden als weitere, potentiell antioxidativ wirksame Substanzen in Kartoffeln bestimmte Pflanzenproteine (AL-SAIKHAN et al., 1995) vermutet, in Fruchtexttrakten wurde der Säuregehalt als wichtiger Einflussfaktor identifiziert (SAMEE et al., 2006). Welche Inhaltsstoffe in *P. odorata* einen Einfluss auf die antioxidative Kapazität gehabt haben können, kann nach aktuellem Kenntnisstand nicht geklärt werden.

Neben weiteren Substanzen, die mit dem ABTS-Radikal reagieren können (AL-SAIKHAN et al., 1995; VAN DEN BERG et al., 1999) weisen ARTS et al. (2004) darauf hin, dass nicht nur die Antioxidantien aus der Probe mit dem ABTS-Radikal reagieren und dessen Entfärbung verursachen, sondern auch deren

Reaktionsprodukte, die mitunter eine höhere antioxidative Kapazität aufweisen als ihre Ausgangssubstanzen. JACOBO-VELÁZQUEZ und CISNEROS-ZEVALLOS (2009) erklären Diskrepanzen zwischen Polyphenolgehalten und der antioxidativen Kapazität durch die Zusammensetzung der Polyphenole, prozentuale Anteile einzelner Verbindungen und Verhältnisse zwischen vorhandenen Phenolen, die, unabhängig vom Gesamtpolyphenolgehalt, die antioxidative Kapazität von Proben beeinflussen können. Mischungen einzelner Polyphenole können synergistische (PEYRAT-MAILLARD et al., 2003), additive (HEO ET AL., 2007) oder antagonistische (PEYRAT-MAILLARD et al., 2003) Wirkungen bei der Neutralisierung reaktiver Sauerstoffspezies haben. Zudem können Glykosylierungen die antioxidative Kapazität von Flavonoiden senken, ohne quantitative Veränderungen hervorzurufen (HOPIA und HEINONEN, 1999).

Unabhängig davon, auf welchen Substanzen die antioxidative Kapazität beruht, dient diese der Einschätzung der physiologischen Wirksamkeit von Extrakten, wenngleich die Übertragbarkeit der in-vitro-Ergebnisse auf die Bedingungen im menschlichen Körper angezweifelt wird (NIKI, 2010; SIES, 2007; SIES et al., 2012).

Die Ergebnisse liefern keine eindeutige Aussage bezüglich der Beeinflussung des TEAC-Wertes durch die gewählten Lichtbedingungen. Grob können die beobachteten Reaktionen der Pflanzen auf die Lichtbedingungen in zwei Gruppen unterteilt werden. In den Klimakammerversuchen und den Folienversuchen im Gewächshaus gab es einen negativen Zusammenhang zwischen der antioxidativen Kapazität und der Tageslichtsumme, eine Beeinflussung durch die spektrale Lichtzusammensetzung war hingegen nicht zu erkennen. Die Erhöhungen der antioxidativen Kapazität durch LEDs in den Gewächshausversuchen des Jahres 2014 sowie ein Vergleich der Kontrollen der einzelnen Versuchsreihen des Jahres 2014 deuten hingegen einen positiven Zusammenhang zwischen antioxidativer Kapazität und der Tageslichtsumme an, ebenfalls ohne eindeutigen Einfluss der spektralen Lichtzusammensetzung. Auf Grundlage der Literaturrecherche wäre eine positive Beeinflussung der antioxidativen Kapazität durch die **Tageslichtsumme** unter natürlichem Licht zu erwarten gewesen. Bei Untersuchungen mit anderen Pflanzen zeigten sich positive Zusammenhänge der antioxidativen Kapazität mit der Lichtintensität (DÍAZ-PÉREZ und ST. JOHN, 2019; HOWARD et al., 2002; PÉREZ-LÓPEZ et al., 2013), ebenso wie positive Korrelationen zwischen Lichtintensität und Polyphenolen (AWAD et al., 2001; FORREST, 1969; LEYVA et al., 1995; PAGE et al., 2012; SHOJI et al., 2011; TAKEDA, 1990; TATTINI et al., 2004; VANDERAUWERA et al., 2005) bzw. Ascorbinsäure (DOWDLE et al., 2007; LAING et al., 2017; WANG et al., 2009; YABUTA et al., 2007; ZHANG et al., 2009).

Da sich die antioxidative Kapazität aus dem Vorhandensein verschiedener Substanzen ergibt, können die Beobachtungen nicht pauschal erklärt werden und ergeben sich aus der Diskussion der Ascorbinsäure (5.1.1), Polyphenole (5.1.3), Flavonoide (5.1.5), Anthocyane (5.1.6) und Carotinoide (5.1.2).

Die meisten Veränderungen der antioxidativen Kapazität verliefen parallel zu Veränderungen des Polyphenolgehalts. Daher waren die deutlich höheren antioxidativen Kapazitäten in den Klimakammerversuchen im Vergleich zum Gewächshaus zu erwarten gewesen, da auch die Polyphenolgehalte höher waren (Tabelle 5.11, Tabelle 5.13). In einem geringen Maße könnten auch leicht höhere Carotinoidgehalte einen Beitrag geleistet haben (Tabelle 5.6, Tabelle 5.8). Die signifikante Steigerung in der Variante FL+G im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (Tabelle 5.16) geht mit einem tendenziellen Anstieg des Polyphenolgehalts einher (Tabelle 5.11). FLp1 und PL57%, bei denen die höchsten antioxidativen Kapazitäten gemessen wurden, wiesen zugleich auch die höchsten Polyphenolgehalte auf (Tabelle 5.13). Die signifikante Erhöhung der antioxidativen Kapazität in der Variante HMG72% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle könnte ebenfalls auf tendenziellen Erhöhungen des Polyphenol- (Tabelle 5.13) und Ascorbinsäuregehalts (Tabelle 5.3) beruhen. Die signifikante Verringerung in der Variante PL40% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle geht mit einem, ebenfalls signifikant, geringeren Polyphenolgehalt einher (Tabelle 5.13), während der Carotinoidgehalt in der Folienvariante signifikant höher war (Tabelle 5.8). Auch der Vergleich der Gewächshausversuche bestätigt den vermuteten Einfluss des Polyphenolgehalts auf die antioxidative Kapazität. Die deutlich höchsten Werte beider Parameter wurden in der Versuchsreihe „GwH13“ bestimmt (Tabelle 5.17, Tabelle 5.14), während der Ascorbinsäuregehalt in dieser Versuchsreihe am geringsten ausfiel (Tabelle 5.2).

Der Vergleich der Versuchsreihen im Gewächshaus und die signifikante Verringerung der antioxidativen Kapazität bei der Variante PL40% in der Klimakammer legen eine Beeinflussung durch die Tageslichtsumme nahe, begründet auf Veränderungen des Polyphenolgehalts als Anpassung an einen verstärkten Photonenfluss (LEYVA et al., 1995), lichtregulierte Gene (SCHWINN et al., 2016) und Enzyme (CREASY, 1968; SHOJI et al., 2011; TAKEDA, 1990; VANDERAUWERA et al., 2005), sowie eine absolute Erhöhung des Gehalts an reaktiven Sauerstoffspezies durch eine gesteigerte Photosynthese (CAKMAK, 2005). Unklar ist, welchen Einfluss die Ascorbinsäuregehalte bei den Gewächshausversuchen und die Carotinoidgehalte bei der Variante PL40% in der Klimakammer auf die antioxidative Kapazität hatten, da sich diese entgegengesetzt zu den Veränderungen der antioxidativen Kapazitäten verhielten. Die signifikante Erhöhung der antioxidativen Kapazität durch die grüne Zusatzbestrahlung in der Versuchsreihe KK13, einhergehend mit einer tendenziellen Erhöhung des Polyphenolgehalts, kann ebenfalls auf Enzymaktivierungen (CREASY, 1968), möglicherweise cryptochrome vermittelt (AHMAD et al., 1995; FUGLEVAND, 1996; WADE et al., 2001), zurückgeführt werden. Die physiologische Bedeutung des kurzwelligen Grünlichtanteils für die Bildung antioxidativ wirksamer Substanzen ist nicht abschließend geklärt und wird in Abschnitt 5.1.6 behandelt.

Obgleich die hohen antioxidativen Kapazitäten der Pflanzen der Klimakammerversuche mit hohen Polyphenol- und Flavonoidgehalten einhergingen, können die Diskrepanzen zu den Gewächshauspflanzen aus pflanzenphysiologischer Sicht nicht erklärt werden. Durch höhere Tageslichtsummen im Gewächshaus und einem Lichtspektrum, das auch die ultraviolette Strahlung umfasst, wären höhere antioxidative Kapazitäten bei einer Kultivierung unter natürlichem Licht zu erwarten gewesen. UV-Strahlung wird

mit einer Steigerung der Gehalte an Substanzen mit starken antioxidativen Eigenschaften assoziiert (BIEZA und LOIS, 2001; FUGLEVAND, 1996; KOES et al., 1989; KOLB et al., 2001; KOYAMA et al., 2012; WADE et al., 2001; WELLMANN et al., 1976) sowie einer Förderung von Hydroxylierungen (RYAN et al., 2002, 2001). Durch die unterschiedlichen Lichtquellen unterschied sich zudem die spektrale Lichtzusammensetzung deutlich zwischen Klimakammer und Gewächshaus. Auch diesbezüglich wären aufgrund der Beteiligung von Cryptochromen (AHMAD et al., 1995; FUGLEVAND, 1996; WADE et al., 2001), Phototropinen (KADOMURA-ISHIKAWA et al., 2013) und Phytochromen (ATTRIDGE und SMITH, 1967; BEGGS et al., 1987; FUGLEVAND, 1996; LANGE et al., 1971; MOHR und DRUMM-HERREL, 1983; SMITH und ATTRIDGE, 1970; WADE et al., 2001) an der Synthese antioxidativ wirksamer Substanzen, insbesondere der dominierenden Polyphenole, geringere Gehalte in der Klimakammer zu erwarten gewesen, da durch die Leuchtstoffröhren vergleichsweise geringere Anteile an Blau- und Rotlicht emittiert werden (Tabelle 4.8). Denkbar ist dennoch eine fördernde Wirkung durch die Leuchtstoffröhren aufgrund starker Emissionsbanden (Abbildung 4.7), die nahe an den Absorptionsmaxima der Photorezeptoren Cryptochrome und Phototropine lagen (Abbildung 2.15). Das Absorptionsmaximum der Phytochrome entspricht hingegen nicht dem Emissionsmaximum der Leuchtstoffröhren im roten Spektralbereich (Abbildung 2.15, Abbildung 4.7). Weiterhin zeichnen sich die Lichtbedingungen in der Klimakammer durch ein deutlich höheres R:FR-Verhältnis aus. Ein verringertes R:FR-Verhältnis resultiert in einem geringen photostationären Zustand der Phytochrome (MORGAN und SMITH, 1976; RUNKLE und HEINS, 2003), welche in ihrer aktiven Form mit einer Akkumulation von Polyphenolen assoziiert werden (ATTRIDGE und SMITH, 1967; BEGGS et al., 1987; JEONG et al., 2012; KIM et al., 2015; LANGE et al., 1971; MANIVANNAN et al., 2015; MOHR und DRUMM-HERREL, 1983; SHIGA et al., 2009; SHOJI et al., 2011). In *Crepidiastrum denticulatum* wurde eine Verringerung des Polyphenolgehalts durch eine zusätzliche Bestrahlung mit fernrotem Licht gemessen, die jedoch von dem B:R- und B:FR-Verhältnis abhing (BAE ET AL., 2019, 2017). In *Betula pendula* kam es durch eine Bestrahlung mit fernrotem Licht zu einer Verringerung der Flavonoidgehalte, zurückgeführt auf eine reduzierte Produktion als Anpassung an eine erwartete Verringerung der UV-B-Strahlung unter Schattenbedingungen. Jedoch wird durch die Studie als zentraler Einflussfaktor der Flavonoidakkumulierung die UV-B-Strahlung dargestellt (TEGELBERG et al., 2004). Bei *Lactuca sativa* führte eine Reduktion des R:FR-Verhältnisses hingegen zu einer Steigerung der antioxidativen Kapazität (LEE et al., 2016). Insofern kann auch das höhere R:FR-Verhältnis unter kontrollierten Bedingungen die höheren Polyphenolgehalte und antioxidativen Kapazitäten nicht abschließend erklären. Dies könnte auch an der Bedeutung des fernroten Lichtes für die Wahrnehmung der Umweltbedingungen liegen. Eine Erhöhung des fernroten Lichtes kann zum einen im Schatten beobachtet werden, wodurch der Pflanze vermittelt wird, dass möglicherweise weniger antioxidativ wirksame Substanzen erforderlich sind. Jedoch kann in unseren Breitengraden auch ein niedrigeres R:FR-Verhältnis im Frühjahr beobachtet werden, wodurch sich die Pflanze möglicherweise auf höhere Tageslichtsummen im Sommer vorbereitet.

Die Bestimmung der antioxidativen Kapazität lässt, ebenso wie die Gesamtpolyphenole, keine tendenzielle Aussage bezüglich der Beeinflussung durch die gewählten Lichtbedingungen zu. Die deutlichsten Reaktionen, sowohl in Bezug auf Veränderungen der Tageslichtsumme, als auch der spektralen Lichtzusammensetzung, wurden jedoch bei geringen Tageslichtsummen der Grundbelichtung bestimmt und bestätigen die Beobachtungen bezüglich der Ascorbinsäure, Carotinoide und Polyphenole. Dies würde dafür sprechen, dass ab einer bestimmten Tageslichtsumme eine Lichtsättigung eingetreten ist.

5.1.5 Flavonoide

Die Flavonoide sind eine Untergruppe der Polyphenole, die aufgrund ihrer insgesamt stark antioxidativen Eigenschaften in die Bestimmung der Gesamtpolyphenole und der antioxidativen Kapazität eingingen. Die Bestimmungsmethode der Flavonoide bezog sich jedoch auf Aluminium-chelatierende Eigenschaften der Verbindungen.

Die Flavonoidgehalte in den Kontrollen lagen zwischen 668,20-1276,55 mg QE 100 g⁻¹ FM in der Klimakammer und zwischen 367,59-598,27 mg QE 100 g⁻¹ FM im Gewächshaus. Bezogen auf die Trockenmasse entspricht dies Gehalten von 45,46-99,65 mg QE g⁻¹ TM bzw. 20,53-46,27 mg QE g⁻¹ TM, die damit deutlich über den Literaturwerten lagen (AHONGSHANGBAM et al., 2014; WORARATPHOKA et al., 2012; YANG et al., 2008). Ein direkter Vergleich mit den Polyphenolgehalten führt aufgrund der unterschiedlichen Standardsubstanzen zu Unstimmigkeiten. Flavonoide werden als Quercetinäquivalente berechnet, wobei Quercetin eine deutlich höhere molare Masse hat (302,24 g mol⁻¹) als Gallussäure (170,12 g mol⁻¹) (BAHORUN et al., 2004; ZHENG und WANG, 2001). Dadurch lassen sich mitunter höhere Flavonoidgehalte im Vergleich zu den Polyphenolen erklären, zum Beispiel bei der Variante HMG55% der Folienversuche in der Klimakammer (Tabelle 5.13, Tabelle 5.23).

Die Flavonoidgehalte der Kontrollen in der **Klimakammer** lagen mit 668,20-1276,55 mg QE 100 g⁻¹ FM über den Werten im Gewächshaus und wiesen zugleich eine große Spannweite auf (Tabelle 5.21, Tabelle 5.23). Einen großen Anteil an den Unterschieden scheinen die verschiedenen Tageslichtsummen der Grundbelichtung ausgemacht zu haben. Die Ergebnisse deuten diesbezüglich einen positiven Zusammenhang zwischen Flavonoidgehalt und Tageslichtsumme an. Eine zusätzliche **LED**-Bestrahlung hatte hingegen keinen signifikanten Einfluss auf den Flavonoidgehalt (Tabelle 5.21). Jedoch führten die blauen LEDs, ähnlich wie bei den Polyphenolen, zu einer tendenziellen Verringerung des Flavonoidgehalts, während grüne LEDs eine tendenzielle Steigerung um 19% bewirkten. Der mittlere Polyphenolgehalt wurde zugleich durch grüne LEDs um circa 11% gesteigert (Tabelle 5.11), die absoluten Gehalte erhöhten sich jedoch in einem vergleichbaren Maße. Folglich wurden durch grüne LEDs vermutlich vorwiegend Flavonoide gebildet. Durch rote LEDs wurden die Flavonoidgehalte nicht beeinflusst. Eine tendenzielle Erhöhung des Gesamtpolyphenolgehalts (Tabelle 5.11) lässt vermuten, dass vermehrt an-

dere Polyphenole, insbesondere Phenolsäuren gebildet wurden. Diese Beobachtung würden die Ergebnisse von SHIGA et al. (2009) bestätigen, die bei *Ocimum basilicum* L. eine rotlichtinduzierte Akkumulation der Phenolsäure Rosmarinsäure gemessen haben.

Tabelle 5.21: Beeinflussung des Flavonoidgehalts [mg 100 g⁻¹ FM] von *P. odorata* durch eine Zusatzbestrahlung mit LEDs: nach drei Wochen, kultiviert in der Klimakammer (Versuchsjahr 2013) unter kontrollierten Bedingungen; beschrieben werden die Gehalte in den LED-Varianten im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle

Lichtvariante*	LICHTBEDINGUNGEN		FLAVONOIDGEHALT***	
	PAR-Wert [μmol m ⁻² s ⁻¹]**	Tageslichtsumme [mol m ⁻² d ⁻¹]**	[mg 100 g ⁻¹ FM]	% Veränderungen gegenüber Kontrolle
FLb	81,17	4,68	668,20 ±100,53	
FL+B	87,96	5,07	582,33 ±50,97	-12,85
FLg	113,1	6,51	724,94 ±37,02	
FL+G	109,35	6,30	860,76 ±167,39	+18,74
FLr	157,31	9,06	912,77 ±28,62	
FL+R	149,50	8,61	913,99 ±111,39	+0,13

*FL+R= Ergänzung der Grundbelichtung durch rote LEDs (zugehörige Kontrolle: FLr), FL+G= Ergänzung der Grundbelichtung durch grüne LEDs (zugehörige Kontrolle: FLg), FL+B= Ergänzung der Grundbelichtung durch blaue LEDs (zugehörige Kontrolle: FLb)

**Zu Beginn des Versuchszeitraums

***Angabe sind Mittelwerte und Standardabweichungen; unterschiedliche Buchstaben bezeichnen signifikante Unterschiede zwischen LED-Variante und zugehöriger Kontrolle, fehlende Buchstaben bedeuten keine signifikanten Unterschiede (Tukey-test, P≤0.05), n=4

Im Vergleich mit der Klimakammer waren die Flavonoidgehalte mit 367,59-598,27 mg QE 100 g⁻¹ FM in den Kontrollen im **Gewächshaus** deutlich geringer (Tabelle 5.22), wiesen jedoch ebenfalls eine große Spannbreite auf. Der Vergleich der Versuchsreihen des Jahres 2014 deutet dabei ebenfalls eine Beeinflussung durch die Tageslichtsummen an. Die höchsten Flavonoidgehalte wurden jedoch in der Versuchsreihe „GwH13“ bestimmt, mit vergleichsweise mittleren Tageslichtsummen an den letzten drei Tagen vor den Probenahmen. Das berechnete Bestimmtheitsmaß zeigt zwar einen signifikanten Zusammenhang zwischen Flavonoidgehalt und Tageslichtsumme (R²=0,28, siehe Anhang, Tabelle 12.24), deutet jedoch an, dass weitere Faktoren relevant waren für die Unterschiede zwischen den Versuchsreihen. Durch die Berücksichtigung der Tages- und Nachttemperatur kann die Varianz zwischen den Versuchsreihen deutlich besser erklärt werden (R²=0,75). Die hohen Flavonoidgehalte in den Kontrollen der Versuchsreihe „GwH13“ bei vergleichbaren Tageslichtsummen an den letzten drei Tagen vor der Probenahme wie bei „GwH14, 24h“ (Abbildung 5.11) suggerieren eine positive Beeinflussung des Flavonoidgehalts durch steigende Temperaturen. Die Versuchsreihe „GwH13“ ausgenommen, wurde für die Versuchsreihen des Jahres 2014 ein stärkerer Zusammenhang mit der Tageslichtsumme (R²=0,47) berechnet. Da für die Versuchsreihen des Jahres 2014 eine Berechnung multipler Korrelationskoeffizienten unter Berücksichtigung von Tageslichtsumme und Tages- und Nachttemperatur aufgrund eines linearen Zusammenhanges nicht möglich war, beruht der positive Effekt einer steigenden Temperatur auf den Flavonoidgehalt folglich nur auf den Ergebnissen der Versuchsreihe „GwH13“.

Dies widerspricht jedoch den Ergebnissen anderer Studien mit anderen Spezies, bei denen eine Aktivierung der Chalkonsynthese durch geringere Temperaturen beschrieben wird (AZUMA et al., 2012; LEYVA et al., 1995; SHVARTS et al., 1997).

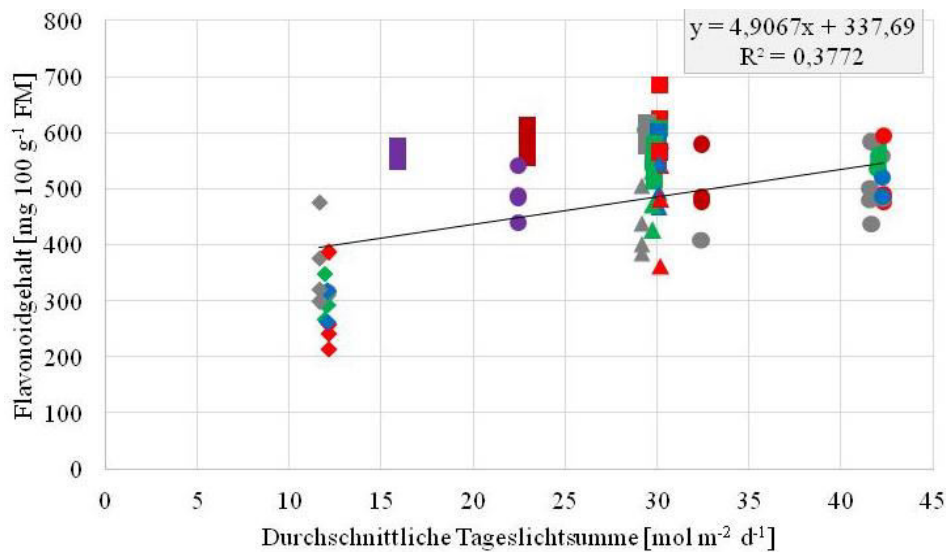


Abbildung 5.10: Zusammenhang zwischen durchschnittlicher Tageslichtsumme an den letzten drei Versuchstagen vor Probenahme und Flavonoidgehalt [mg/ 100 g FM] im Gewächshaus; Quadrate: „GwH13“, Kreise: „GwH14“, Rauten: „GwH14, nachts“, Dreiecke: „GwH14, 24h“; Regressionsgerade mit Regressionskoeffizienten (R^2) und Formel bezieht sich auf die Kontrollen (grau)

Insgesamt wurden die Flavonoidgehalte in den Gewächshausversuchen durch die zusätzlichen **LED**-Beleuchtungen nicht signifikant beeinflusst (Tabelle 5.22). Jedoch können die Ergebnisse möglicherweise dazu beitragen, die mitunter unerwarteten Beeinflussungen der Polyphenolgehalte in den Gewächshausversuchen zu erklären (Tabelle 5.12). Da es im Hinblick auf den Flavonoidgehalt in den LED-Varianten der Versuchsreihe „GwH13“ kaum Unterschiede zur Kontrolle gab, kann die tendenziell deutliche Abnahme der Polyphenole in den LED-Varianten (Tabelle 5.12) nicht auf quantitative Veränderungen der Flavonoide zurückgeführt werden. Gleiches gilt für die Versuchsreihe „GwH14“, bei der durch grüne LEDs eine signifikante Reduktion des Gesamtpolyphenolgehalts zu beobachten war, zugleich jedoch eine tendenzielle Steigerung des Flavonoidgehalts verzeichnet wurde. In der Versuchsreihe „GwH14, 24h“ gab es hingegen eine signifikante Erhöhung des Gesamtpolyphenolgehalts durch blaue LEDs. Der Flavonoidgehalt wurde nicht signifikant und, die absoluten Zahlen betrachtet, deutlich geringer erhöht. Dies spricht für eine Förderung der Phenolsäurenakkumulation durch blaue LEDs. Dies stimmt überein mit Beobachtungen von SHIGA et al.(2009) bezüglich einer gesteigerten Synthese von Phenolsäuren durch blaues Licht und würde die beobachtete positive Wirkung blauer Spektralbereiche auf die PAL-Aktivität in anderen Pflanzen bestätigen (ATTRIDGE und SMITH, 1974, 1967; CREASY, 1968; NOH und SPALDING, 1998; SMITH und ATTRIDGE, 1970).

Der Einfluss einer nächtlichen Zusatzbestrahlung auf die Flavonoidakkumulation ist nicht eindeutig. In der Versuchsreihe „GwH14, 24h“ kam es zu einer Steigerung der Flavonoidgehalte durch die zusätzliche LED-Bestrahlung, die im Mittel höher ausfiel als bei der Versuchsreihe „GwH14“. Eine Zusatzbe-

strahlung nur während der Nacht in der Versuchsreihe „GwH14, nachts“ führte hingegen zu einer tendenziellen Verringerung der Gehalte. Es gibt nur wenige Studien, in denen eine Beeinflussung von Inhaltsstoffen durch nächtliche Bestrahlung untersucht wurde. Ein nächtlicher Einsatz blauer LEDs bewirkte eine gesteigerte Genexpression der Flavonolsynthese (EBISAWA et al., 2008) sowie höhere Gehalte an bestimmten Polyphenolen, vorwiegend Phenolsäuren (OUZOUNIS et al., 2015). Eine Verringerung des Flavonoidgehalts durch eine nächtliche Bestrahlung, vor allem mit blauen LEDs, war somit unerwartet. Allerdings sind die Unterschiede nicht signifikant und Untersuchungsergebnisse der Studie mit *Lactuca sativa* weisen auf sortenspezifische Unterschiede hin (OUZOUNIS et al., 2015).

Tabelle 5.22: Beeinflussung des Flavonoidgehalts [mg 100 g⁻¹ FM] von *P. odorata* durch eine Zusatzbestrahlung mit LEDs (B=Blau, G=Grün, R=Rot): kultiviert im Gewächshaus mit natürlichen Licht; beschrieben werden die Gehalte in den LED-Varianten (NL+B, NL+G, NL+R) im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (NL)

Bedingungen*	VERSUCHSREIHE							
	„GwH13“		„GwH14“		„GwH14, nachts“		„GwH14, 24 h“	
	TLS [mol m ⁻² d ⁻¹]							
TT [°C]	29,46 ±12,50		41,64 ± 3,35		11,64 ± 6,02		29,16 ± 6,16	
	30,13 ± 3,88		23,82 ± 0,34		22,06 ± 1,12		21,24 ± 1,13	
Variante	FLAVONOIDGEHALTE**							
	mg/ 100 g		[%]		mg/ 100 g		[%]	
NL	598,27 ±17,07		501,01 ±61,53		367,59 ±79,06		432,94 ±46,17	
NL+B	574,99 ±21,39	-3,9	512,75 ±34,05	+2,3	297,07 ±25,86	-19,2	500,55 ±28,08	+15,6
NL+G	555,08 ±29,10	-7,2	554,39 ±16,86	+10,7	303,19 ±34,07	-17,5	485,62 ±40,96	+12,2
NL+R	620,48 ±49,59	+3,7	510,48 ±56,02	+1,9	275,26 ±76,27	-25,1	492,90 ±83,74	+13,9

*Durchschnittliche Tageslichtsummen (TLS) und Tagestemperatur (TT) der Kontrolle, berechnet für die letzten drei Tage vor der Probenahme

**Angegeben sind Mittelwerte und Standardabweichungen; kursiv geschrieben: prozentuale Veränderungen im Vergleich zur Kontrolle; unterschiedliche Buchstaben bezeichnen signifikante Unterschiede innerhalb einer Versuchsreihe zwischen Behandlungen, fehlende Buchstaben bedeuten keine signifikanten Unterschiede (Tukey-test, P≤0.05), n=4

Überdeckungen mit **photoselktiven Folien** in der **Klimakammer** bestätigten die Beobachtungen der LED-Versuche in der Klimakammer und des Vergleichs der Versuchsreihen im Gewächshaus im Hinblick auf eine positive Beeinflussung des Flavonoidgehalts durch die Tageslichtsumme (Tabelle 5.23). Durch die Folienvarianten HMG55% und PL40% wurde der Flavonoidgehalt (Tabelle 5.25), ebenso wie der Polyphenolgehalt (Tabelle 5.13), signifikant verringert. Unter Berücksichtigung der reduzierten Tageslichtsummen (Abbildung 5.11) deutet sich jedoch eine positive Beeinflussung des Flavonoidgehalts durch die Modifizierung der spektralen Lichtzusammensetzung unter den Folien an. Ein tendenzieller Anstieg des Polyphenolgehalts bei der Variante HMG72% und eine Abnahme des Flavonoidgehalts kann ein Hinweis sein, dass vorwiegend Phenolsäuren gebildet wurden. Möglich wäre auch eine Erhöhung der antioxidativen Eigenschaften durch Hydroxylierungen, resultierend in gesteigerten Gehalten an reduzierenden Polyphenolen, welche mit der Folin-Ciocalteu-Methode bestimmt wurden (SINGLETON et al., 1999). Gesteigerte reduzierende Eigenschaften können aus einer erhöhten Expression von Hydroxylasen resultieren, die in anderen Pflanzen lichtabhängig (AZUMA et al., 2012; KALTENBACH et al., 1999) und durch phytochromevermittelte Signalkaskaden gefördert wird (BOTTOMLEY et al., 1965). Durch die Folien wurde der rote Spektralbereich kaum verändert, wodurch möglicherweise

die tendenziellen Erhöhungen der Polyphenolgehalte (Tabelle 5.13) bei verringerten Flavonoidgehalten (Tabelle 5.23) erklärbar sind. Ähnlich könnte auch die tendenzielle Erhöhung des Polyphenolgehalts durch zusätzliche rote LEDs in den Klimakammerversuchen bei unverändertem Flavonoidgehalt gedeutet werden.

Tabelle 5.23: Beeinflussung des Flavonoidgehalts [mg 100 g⁻¹ FM] von *P. odorata* durch eine Überdeckung mit photoselektiven Folien: nach drei Wochen, kultiviert in der Klimakammer (Versuchsjahr 2013) unter kontrollierten Bedingungen; beschrieben werden die Gehalte in den Folien-Varianten im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle

Lichtvariante*	LICHTBEDINGUNGEN		FLAVONOIDGEHALT***	
	PAR-Wert [μmol m ⁻² s ⁻¹]**	Tageslichtsumme [mol m ⁻² d ⁻¹]**	[mg 100 g ⁻¹ FM]	% Veränderungen gegenüber Kontrolle
FLh1	113,1	6,51	724,94 ±37,02	
HMG72%	81,43	4,69	637,67 ±72,67	-12,04
FLp1	81,17	4,68	668,20 ±100,53	
PL57%	46,27	2,67	677,14 ±74,85	+1,34
FLh2	190,06	10,95	1276,55a ±68,70	
HMG55%	104,53	6,02	1071,61b ±45,13	-16,05
FLp2	157,31	9,06	912,77a ±28,62	
PL40%	62,92	3,62	689,73b ±44,57	-24,44

* FL+HMG72%= Überdeckung der Pflanzen mit der Half Minus Green-Folie, erreichte Lichtintensität: 72% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLh1), FL+PL57%= Überdeckung der Pflanzen mit der Pale Lavander-Folie, erreichte Lichtintensität: 57% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLp1), FL+HMG55%= Überdeckung der Pflanzen mit der Half Minus Green-Folie, erreichte Lichtintensität: 55% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLh2), FL+PL40%= Überdeckung der Pflanzen mit der Pale Lavander-Folie, erreichte Lichtintensität: 40% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLp2),

** Zu Beginn des Versuchszeitraums

*** Angegeben sind Mittelwerte und Standardabweichungen; unterschiedliche Buchstaben bezeichnen signifikante Unterschiede zwischen Folien-Variante und zugehöriger Kontrolle, fehlende Buchstaben bedeuten keine signifikanten Unterschiede (Tukey-test, P≤0.05), n=4

Tabelle 5.24: Beeinflussung des Flavonoidgehalts [mg 100 g⁻¹ FM] von *P. odorata* durch eine Überdeckung mit photoselektiven Folien (HMG=Half Minus Green, PL=Pale Lavander): nach drei Wochen, kultiviert im Gewächshaus mit natürlichen Licht; beschrieben werden die Gehalte in den LED-Varianten (NL+B, NL+G, NL+R) im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (NL)

Bedingungen*		VERSUCHSREIHE			
		„GwH13“		„GwH14“	
TLS	[mol m ⁻² d ⁻¹]	29,46 ±12,50		41,64 ± 3,35	
TT					
[°C]		30,13 ± 3,88		23,82 ± 0,34	
Variante		FLAVONOIDGEHALTE**			
		mg/ 100 g		mg/ 100 g	
		[%]		[%]	
		NL	598,27 ±17,07	501,01 ±61,53	
		NL+HMG	580,04 ±26,41	-3,05%	487,83 ±70,38
NL+PL	564,35 ±13,05	-5,67%	488,24 ±41,96	-2,55	

*Durchschnittliche Tageslichtsummen (TLS) und Tagestemperatur (TT) der Kontrolle, berechnet für die letzten drei Tage vor der Probenahme

**Angegeben sind Mittelwerte und Standardabweichungen; kursiv geschrieben: prozentuale Veränderungen im Vergleich zur Kontrolle; unterschiedliche Buchstaben bezeichnen signifikante Unterschiede innerhalb einer Versuchsreihe zwischen Behandlungen, fehlende Buchstaben bedeuten keine signifikanten Unterschiede (Tukey-test, P≤0.05), n=4

Analog zu den Versuchen mit zusätzlichen LEDs im **Gewächshaus** führten auch Überdeckungen der Pflanzen mit **photoselektiven Folien** zu keinen signifikanten Unterschieden zwischen den Varianten

(Tabelle 5.24). Im Unterschied zu den Klimakammerversuchen bewirkten die Überdeckungen der Pflanzen mit Folien Verringerungen der Polyphenolgehalte (Tabelle 5.14) bei vergleichsweise gleichbleibenden Flavonoidgehalten (Tabelle 5.24). Dies kann auf eine Reduktion der reduzierenden Eigenschaften der Polyphenole oder eine Verringerung des Gehaltes an Nicht-Flavonoiden hindeuten.

Abbildung 5.11 bestätigt graphisch und durch den berechneten Regressionskoeffizienten einen stark positiven Zusammenhang zwischen den Flavonoidgehalten und den Tageslichtsummen. Die Flavonoidgehalte in den Folienvarianten deuten zudem eine positive Beeinflussung durch die Modifizierung des Lichtspektrums an, insbesondere der Vergleich der Varianten HMG55%, FL+G und FLg.

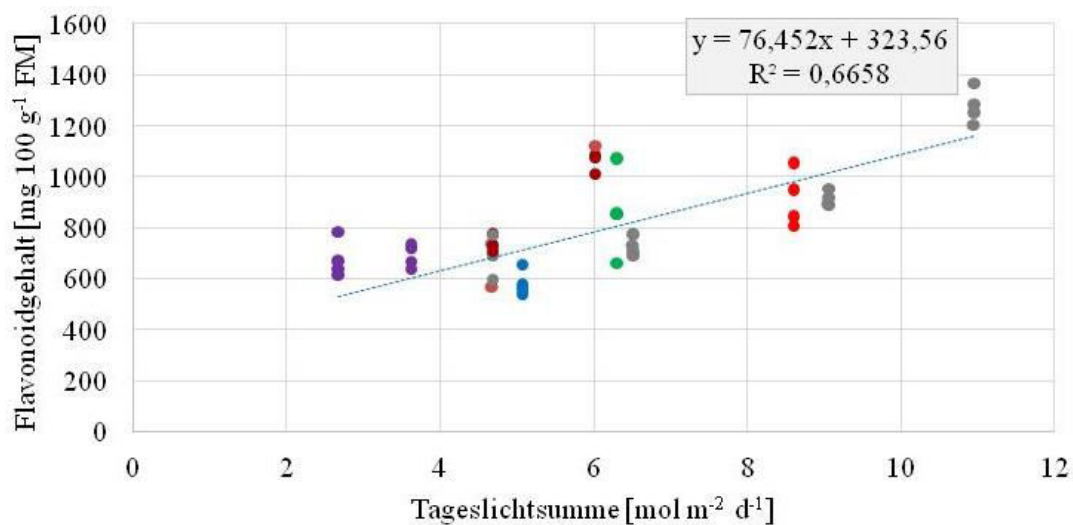


Tabelle 5.25: Zusammenhang zwischen Lichteigenschaften und dem Flavonoidgehalt in *P. odorata*, kultiviert in der Klimakammer bzw. im Gewächshaus mit Lichtmodifikationen durch zusätzliche LED-Beleuchtung oder photoselektive Folien; angegeben sind partielle Korrelationskoeffizienten nach Spearman (LED-Versuche im Gewächshaus) bzw. nach Pearson (LED-Versuche in der Klimakammer; Folien-Versuche in der Klimakammer und im Gewächshaus)

		Korrelationskoeffizienten											
		TLS*	Spektralbereichsanteile						Verhältnisse				
			401-450	451-500	501-550	551-600	601-650	651-700	B:R	BR:G	B:G	R:G	R:FR
LED	KK13	0,76	0,03	-0,15	0,06	-0,04	-0,06	-0,06	-0,35	-0,32	-0,33	-0,17	
	GwH13	0,21	0,07	-0,37	-0,56	0,63	-0,27	-0,30	-0,54	0,55	0,07	0,62	
	GwH14	-0,16	-0,41	0,30	0,14	-0,53	0,19	0,27	0,24	-0,28	-0,20	-0,32	
	GwH14, nachts	-0,58	0,17	-0,60	-0,12	-0,71	-0,60	0,76	-0,01	0,11	0,16	0,13	
	GwH14, 24h	0,39	-0,21	0,17	-0,06	-0,25	0,11	0,25	0,14	-0,07	-0,22	-0,07	
Folie	KK13	0,80	-0,02	0,43	0,03	-0,23	0,16	-0,38	-0,20	0,68	0,37	0,60	-0,29
	GwH13	0,63	0,27	0,58	0,59	-0,65	0,68	-0,66	0,06	0,04	0,05	-0,07	-0,10
	GwH14	0,10	0,78	-0,13	0,39	-0,33	0,62	-0,32	0,07	0,04	0,08	-0,09	-0,21
	Ø	0,35	0,12	0,03	0,06	-0,29	0,12	-0,05	-0,08	0,12	-0,00	0,09	-0,20

Fett geschrieben: signifikant ($P \leq 0,05$)

*TLS=Tageslichtsumme

Der positive Zusammenhang zwischen Flavonoidgehalt und **Tageslichtsumme** wird durch andere Studien bestätigt (AWAD et al., 2001; FORREST, 1969; LEYVA et al., 1995; PAGE et al., 2012; TAKEDA, 1990; TATTINI et al., 2004; VANDERAUWERA et al., 2005). Steigende Tageslichtsummen werden mit Aktivitätserhöhungen beteiligter Enzyme assoziiert (CREASY, 1968; SHOJI et al., 2011; TAKEDA, 1990; VANDERAUWERA et al., 2005), und einem verstärkten Photonenüberschuss, der eine Akkumulation von Antioxidanten erforderlich macht (LEYVA et al., 1995). Eine mögliche Beeinflussung durch UV-Licht (BIEZA und LOIS, 2001; FUGLEVAND, 1996; KOES et al., 1989; KOLB et al., 2001; KOYAMA et al., 2012; WADE et al., 2001; WELLMANN et al., 1976) kann durch die vorliegende Arbeit hingegen nicht bestätigt werden. Im Mittel wurden in der Klimakammer höhere Flavonoidgehalte bestimmt als im Gewächshaus, obgleich die Leuchtstoffröhren in den Klimakammerversuchen kaum **UV-Licht** emittierten. Auch die Versuche mit photoselektiven Folien im Gewächshaus deuten keine Beeinflussung durch das UV-Licht an, da die Flavonoidgehalte durch die verwendeten Folien relativ konstant blieben, das UV-Licht jedoch zu 37% (PL) bzw. 47% (HMG) durch die Folien absorbiert wurde (siehe Anhang 3).

Die meist negativen Korrelationen des Flavonoidgehalts mit dem **langwelligen Grünlichtanteil** können dadurch erklärt werden, dass, unter der Annahme, dass Flavonoide als Reaktion auf die Bildung reaktiver Sauerstoffspezies in der photosynthetischen Elektronentransportkette (CAKMAK, 2005; LEYVA et al., 1995) synthetisiert werden, langwelliges Grünlicht kaum Relevanz hat. Zudem assoziieren Pflanzen mit dem langwelligen Grünlicht Schattenbedingungen, bei denen keine übermäßige Akkumulation antioxidativ wirksamer Substanzen erforderlich ist. In dem Zusammenhang könnte eine mögliche Beteiligung von Cryptochromen an der Flavonoidakkumulation (LIU et al., 2011) bedeuten, dass langwelliges Grünlicht durch eine Verminderung cryptochrome-kontrollierter Reaktionen die Flavonoidakkumulation unterdrückt (BOULY et al., 2007).

Überraschenderweise konnte keine Beeinflussung durch **blaues** und **rotes Licht** beobachtet werden. Bei den LED-Versuchen ist dies möglicherweise darauf zurückzuführen, dass das Emissionsspektrum der roten LEDs nicht mit dem Absorptionsmaximum der Phytochrome übereinstimmt. Die Korrelationen zwischen kurzwelligen Rotlichtanteil und Flavonoidgehalt in den Folierversuchen im Gewächshaus deuten jedoch einen Zusammenhang an und bestätigen somit andere Studien, in denen eine phytochromevermittelte Synthese von Flavonoiden, zurückgeführt auf gesteigerte Aktivitäten der CHS, beobachtet wurden (ATTRIDGE und SMITH, 1967; FUGLEVAND, 1996; KOES et al., 1989; MIAO et al., 2016; SMITH und ATTRIDGE, 1970; WADE et al., 2001).

Insgesamt zeigte sich eine starke Beeinflussung der Flavonoidgehalt in *P. odorata* durch die Tageslichtsumme. Eine Wirkung einzelner Spektralbereiche war hingegen nicht eindeutig. Jedoch zeigt der Vergleich der Versuchsstandorte, dass möglicherweise eine starke Bestrahlung in schmalen Spektralbereichen für die Akkumulation von Flavonoiden vorteilhaft war. Einige Korrelationen deuten diesbezüglich auf einen Einfluss der Emissionsbande der Leuchtstoffröhren im kurzwelligen Rotlichtbereich hin. Jedoch ist es auch denkbar, dass die Emissionsbande im kurzwelligen Blaulichtbereich aufgrund der Nähe zu den Absorptionsmaxima von Cryptochromen und Phototropinen relevant war. Der Vergleich der Versuchsstandorte zeigt fast doppelt so hohe Flavonoidgehalten in den Kontrollen der Klimakammer im Vergleich zum Gewächshaus. Bezogen auf die aufgenommene Flavonoidmenge bei Einhaltung der „5-a-day“-Regel⁴ bedeutet dies eine Reduktion der Verzehrsmenge von *P. odorata* von 168 g (Gewächshausanbau) auf 89 g (kontrollierte Bedingungen). Durch Lichtmodifikationen wurden die Gehalte und entsprechenden Aufnahmemengen nicht nennenswert verändert.

5.1.6 Anthocyane

Über das Vorkommen und Gehalte an Anthocyanen in *P. odorata* gibt es bislang keine Studien. Dabei lässt sich auf der Blattunterseite der verwendeten Pflanzen mitunter eine burgunder Färbung feststellen, die vermutlich auf dem Vorhandensein von Anthocyanen beruht.



Abbildung 5.12: Blattunterseite von *P. odorata* zu Versuchsende nach Kultivierung mit zusätzlicher roter LED-Bestrahlung im Gewächshaus; links: Versuchsreihe „GwH13“, rechts: Versuchsreihe „GwH14, 24h“

⁴ Für Flavonoide liegt derzeit keine Aufnahmeempfehlung vor. Die angegebenen Werte beziehen sich auf eine Studie von WILLIAMSON und HOLST (2008), die eine durchschnittliche Flavonoidaufnahmemenge berechneten anhand der „5-a-day“-Regel (5 Portionen Obst und Gemüse am Tag) (siehe Abschnitt 2.4.2.3)

Wie in Abbildung 5.12 zu erkennen, scheint *P. odorata* die Anlagen zur Synthese von Anthocyanen zu haben. Die Gehalte variierten in den Kontrollen jedoch stark. In der Klimakammer und in der Versuchsreihe „GwH13“ wurden keine Anthocyane nachgewiesen. In den anderen Versuchsreihen im Gewächshaus lagen die Gehalte zwischen 11,69-20,44 mg 100 g⁻¹ FM in den Kontrollen (Tabelle 5.26). Die höchsten Anthocyangehalte bezogen auf den Flavonoidgehalt wurden in der Variante NL+G („GwH14, nachts“) bestimmt, in der die Anthocyane rechnerisch etwa 14% der Flavonoide ausmachten.

In den **LED**-Versuchen im **Gewächshaus** wurden die höchsten Anthocyangehalte in der Versuchsreihe „GwH14, nachts“ gemessen, wobei bei allen Varianten und Versuchsreihen die Streuung der Messergebnisse sehr hoch war. Da in der Versuchsreihe „GwH13“ keine Anthocyane nachgewiesen wurden, die durchschnittliche Tageslichtsumme an den letzten drei Tagen vor der Probenahme jedoch vergleichsweise in einem mittleren Bereich lag, ist es nicht verwunderlich, dass bei der Berechnung der multiplen Korrelationen das Bestimmtheitsmaß für den Zusammenhang zwischen Anthocyangehalt und Tageslichtsumme nicht signifikant war ($R^2 = 0,26$). Unter Einbeziehung der Temperaturen liegt das höchste berechnete Bestimmtheitsmaß für eine Kombination von Tageslichtsumme, Tages- und Nachttemperatur bei $R^2 = 0,59$ (siehe Anhang, Tabelle 12.24). Eine reduzierende Wirkung hoher Temperaturen auf die Anthocyanakkumulation wurde bereits für andere Spezies nachgewiesen (AZUMA et al., 2012; LEYVA et al., 1995; OREN-SHAMIR et al., 2003; PIETRINI und MASSACCI, 1998; TAN, 1980). Diese wird mitunter auf sinkenden Aktivitäten des COP1 bei niedrigen Temperaturen (CATALA et al., 2011) zurückgeführt, welches durch Ubiquitinierung und Degradierung der MYB Transkriptionsfaktoren PAP1 und PAP2, positiven Regulatoren der Anthocyan synthese (LI et al., 2012c; MAIER et al., 2013), die Anthocyan synthese behindert. Das relativ geringe Bestimmtheitsmaß deutet jedoch eine Beeinflussung durch weitere Faktoren an.

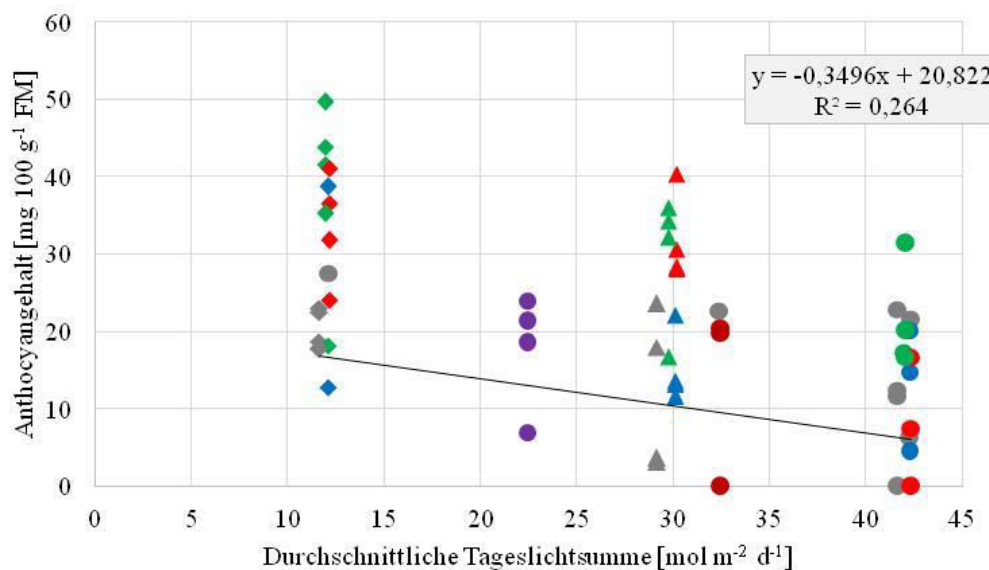


Abbildung 5.13: Zusammenhang zwischen durchschnittlicher Tageslichtsumme an den letzten drei Versuchstagen vor Probenahme und Anthocyangehalt [mg/ 100 g FM] im Gewächshaus; Quadrate: „GwH13“, Kreise: „GwH14“, Rauten: „GwH14, nachts“, Dreiecke: „GwH14, 24h“; Regressionsgerade mit Regressionskoeffizienten (R^2) und Formel bezieht sich auf die Kontrollen (grau)

Eine zusätzliche Bestrahlung mit LEDs bewirkte starke Veränderungen der Anthocyangehalte. In allen Versuchsreihen hatten grüne LEDs einen tendenziell positiven Einfluss im Vergleich zur Kontrolle (Tabelle 5.26), in der Versuchsreihe „GwH14, nachts“ signifikant. Bei den Pflanzen mit roter Zusatzbeleuchtung wurden in den Versuchsreihen „GwH14, nachts“ und „GwH14, 24h“ höhere Werte im Vergleich zur Kontrolle bestimmt, in letzterer war der Unterschied signifikant.

Tabelle 5.26: Beeinflussung des Anthocyangehalts [mg 100 g⁻¹ FM] von *P. odorata* durch eine Zusatzbestrahlung mit LEDs (B=Blau, G=Grün, R=Rot): kultiviert im Gewächshaus mit natürlichen Licht; beschrieben werden die Gehalte in den LED-Varianten (NL+B, NL+G, NL+R) im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (NL)

Bedingungen *		VERSUCHSREIHE								
		„GwH13“	„GwH14“	„GwH14, nachts“	„GwH14, 24 h“					
TLS	[mol m ⁻² d ⁻¹]	29,46 ±12,50	41,64 ± 3,35	11,64 ± 6,02	29,16 ± 6,16					
TT	[°C]	30,13 ± 3,88	23,82 ± 0,34	22,06 ± 1,12	21,24 ± 1,13					
Variante	ANTHOCYANGEHALTE**									
	mg/ 100 g		[%]		mg/ 100 g		[%]			
	NL		n.n.		11,69 ±9,32		20,44 b ±2,64		12,05 b ±8,93	
	NL+B		n.n.		11,41 ±7,29 -2,4		24,26 ab ±11,41 +18,7		15,14 ab ±4,13 +25,6	
	NL+G		n.n.		21,42 ±6,89 +83,2		42,59 a ±5,95 +108,4		29,80 ab ±7,67 +147,3	
	NL+R		n.n.		11,41 ±9,60 -2,4		33,37 ab ±7,28 +63,3		31,87 a ±5,02 +164,5	

*Durchschnittliche Tageslichtsummen (TLS) und Tagestemperatur (TT) der Kontrolle, berechnet für die letzten drei Tage vor der Probenahme

**Angabe sind Mittelwerte und Standardabweichungen; kursiv geschrieben: prozentuale Veränderungen im Vergleich zur Kontrolle; unterschiedliche Buchstaben bezeichnen signifikante Unterschiede innerhalb einer Versuchsreihe zwischen Behandlungen, fehlende Buchstaben bedeuten keine signifikanten Unterschiede (Tukey-test, P≤0.05), n=4

Durch eine Überdeckung mit *photosелеktiven Folien* wurden in der Versuchsreihe „GwH14“ die Anthocyangehalte nicht signifikant beeinflusst, jedoch gab es tendenziell höhere Werte in der PL-Variante (Tabelle 5.27). Die tendenzielle Erhöhung des Anthocyangehalts durch die Folien widerspricht jedoch den Erwartungen, da die Anwesenheit von Anthocyanen unter Umständen die Photosyntheserate senken kann (BURGER und EDWARDS, 1996) und somit nicht vorteilhaft ist bei limitierten Lichtbedingungen. Aufgrund anderer Studien (PIETRINI et al., 2002) ist dies jedoch umstritten. Der tendenziell positive Effekt der Folien auf den Anthocyangehalt kann möglicherweise auf der starken Absorption des langwelligeren Grünlichtanteils begründet sein. Dieser wird aufgrund der Absorption durch aktive Cryptochrome mit dessen Inaktivierung assoziiert, wodurch eine mögliche cryptochromevermittelte Anthocyan-synthese behindert würde (BOULY et al., 2007; CARVALHO und FOLTA, 2016). Wenig beeinflusst durch die photosелеktiven Folien wurden hingegen die Spektralbereiche, die für die Aktivierung von Cryptochromen und Phytochromen zuständig sind (Abbildung 2.15). Beide Photorezeptoren wurden in anderen Studien mit der Anthocyan-synthese assoziiert (MANCINELLI et al., 1991).

Tabelle 5.27: Beeinflussung des Anthocyangehalts [mg 100 g⁻¹ FM] von *P. odorata* durch eine Überdeckung mit photoselektiven Folien (HMG=Half Minus Green, PL=Pale Lavander): nach drei Wochen, kultiviert im Gewächshaus mit natürlichen Licht; beschrieben werden die Gehalte in den LED-Varianten (NL+B, NL+G, NL+R) im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (NL)

Bedingungen*		VERSUCHSREIHE			
		„GwH13“		„GwH14“	
TLS [mol m ⁻² d ⁻¹]		29,46 ±12,50		41,64 ± 3,35	
TT [°C]		30,13 ± 3,88		23,82 ± 0,34	
Variante		ANTHOCYANGEHALTE**			
		mg/ 100 g		mg/ 100 g	
		[%]		[%]	
		NL		n.n.	
		NL+HMG		n.n.	
NL+PL		n.n.		n.n.	

*Durchschnittliche Tageslichtsummen (TLS) und Tagestemperatur (TT) der Kontrolle, berechnet für die letzten drei Tage vor der Probenahme

**Angabe sind Mittelwerte und Standardabweichungen; kursiv geschrieben: prozentuale Veränderungen im Vergleich zur Kontrolle; unterschiedliche Buchstaben bezeichnen signifikante Unterschiede innerhalb einer Versuchsreihe zwischen Behandlungen, fehlende Buchstaben bedeuten keine signifikanten Unterschiede (Tukey-test, P≤0.05), n=4

Die Korrelationskoeffizienten (Tabelle 5.28) ermöglichen einen Vergleich der verschiedenen Versuchsreihen. Ein signifikanter Zusammenhang zwischen Anthocyangehalt und Tageslichtsumme konnte für keine Versuchsreihe berechnet werden. Auffällig sind hingegen die starken, positiven Korrelation mit dem kurzwelligen Grünlichtanteil, welche durch negative Korrelationen mit den BR:G- und B:G-Verhältnissen bestätigt werden. Die gemittelten Korrelationskoeffizienten zeigen zudem eine schwächere, negative Korrelation mit dem langwelligen Grünlichtanteil.

Tabelle 5.28: Zusammenhang zwischen Lichteigenschaften und dem Anthocyangehalt in *P. odorata*, kultiviert in der Klimakammer bzw. im Gewächshaus mit Lichtmodifikationen durch zusätzliche LED-Beleuchtung oder photoselektive Folien; angegeben sind partielle Korrelationskoeffizienten nach Spearman (LED-Versuche im Gewächshaus) bzw. nach Pearson (LED-Versuche in der Klimakammer; Folien-Versuche in der Klimakammer und im Gewächshaus)

		Korrelationskoeffizienten											
		TLS*	Spektralbereichsanteile						Verhältnisse				
			401-450	451-500	501-550	551-600	601-650	651-700	B:R	BR:G	B:G	R:G	R:FR
LED	KK13	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
	GwH13	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
	GwH14	-0,05	0,08	0,42	0,62	0,38	0,48	-0,31	0,00	-0,56	-0,29	-0,29	-0,29
	GwH14, nachts	0,33	-0,43	0,07	0,65	-0,18	0,06	0,18	-0,11	-0,71	-0,74	-0,45	-0,45
	GwH14, 24h	0,40	-0,15	-0,12	0,85	-0,71	0,06	0,71	-0,31	-0,59	-0,53	-0,24	-0,24
Folie	KK13	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
	GwH13	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	-
	GwH14	-0,29	0,23	0,77	0,35	-0,67	0,62	-0,44	-0,06	-0,06	-0,06	0,07	0,05
	Ø	0,10	-0,07	0,34	0,65	-0,36	0,33	0,07	-0,12	-0,51	-0,44	-0,27	0,05

Fett geschrieben: signifikant (P≤0.05)

*TLS= Tageslichtsumme

Die Korrelationskoeffizienten (Tabelle 5.28) zeigen keine eindeutige Beeinflussung des Anthocyangehalts durch das kurzwellige Blaulicht. Auch in den LED-Versuchen waren die erreichten Erhöhungen

bei Supplementierung mit **blauen LEDs** vergleichsweise gering. Ähnlich verhält sich dies im Hinblick auf das rote Licht. Dies ist überraschend, da in mehreren Pflanzenspezies eine Erhöhung der Anthocyanakkumulation durch blaue (MANCINELLI et al., 1991; STUTTE et al., 2009), und rote (ATTRIDGE und SMITH, 1967; BEGGS et al., 1987; LANGE et al., 1971; MOHR und DRUMM-HERREL, 1983) Spektralbereiche beobachtet wurde, zurückgeführt auf eine Beteiligung von Cryptochromen und Phytochromen an der Anthocyanakkumulation (MANCINELLI et al., 1991) und gesteigerte Genexpressionen der PAL und CHS (CHRISTIE und JENKINS, 1996; GUO et al., 2001). Zumindest durch eine zusätzliche Bestrahlung mit roten LEDs wurde in den Versuchsreihen „GwH14, nachts“ und „GwH14, 24h“ eine tendenzielle, bzw. signifikante, Beeinflussung des Anthocyangehalts beobachtet, bestätigt auch durch die Korrelationskoeffizienten der Folienversuche der Versuchsreihe „GwH14“.

Auch die deutlichen, teils signifikanten Steigerungen der Anthocyangehalte durch **grüne LEDs**, einhergehend mit signifikanten Korrelationen, sind zunächst überraschend. Aufgrund der Beteiligung von Cryptochromen an der Anthocyanakkumulation scheint die positive Beeinflussung durch den grünen Spektralbereich im Widerspruch zu stehen zu Ergebnissen von BOULY et al. (2007), die in *Arabidopsis* cryptochromevermittelt eine Steigerung des Anthocyangehalts durch blaues Licht und eine Verminderung durch zusätzliches grünes Licht beobachtet haben. Jedoch hatte grünes Licht nur bei vorheriger oder gleichzeitiger Bestrahlung mit blauem Licht einen reduzierenden Effekt und in der Studie wurde grünes Licht der Wellenlänge 582 ± 10 nm verwendet. Dieses entspricht dem langwelligen Grünlichtanteil, welcher auch in der vorliegenden Arbeit negativ mit dem Anthocyangehalt korrelierte und somit die Ergebnisse der Studie bestätigt. Eine andere Studie von CARVALHO und FOLTA (2016) deutet hingegen eine anthocyangehaltssteigernde Wirkung einer Bestrahlung mit grünem Licht der Wellenlänge 525 nm an. Bei verschiedenen Microgreens wurde insgesamt eine steigernde Wirkung von Grünlicht in Kombination mit fernroten Licht beobachtet, während die Beeinflussung bei einer blauen Grundbelichtung intensitätsabhängig unterschiedliche Effekte auf den Anthocyangehalt hatte. Vermutet wird von den Autoren eine Anregung der Phytochrome durch das zusätzliche grüne Licht. Zudem kann grünes Licht mit kürzeren Wellenlängen (nahe 500 nm) auch von Cryptochromen absorbiert werden (Abbildung 2.15) und dadurch die cryptochromevermittelte Anthocyansynthese unterstützen. Da jedoch eine Bestrahlung mit kurzwelligem Blaulicht, welches näher am Absorptionsmaximum der Cryptochrome liegt, kaum einen Effekt hatte, wird eine Aktivierung von Cryptochromen durch grünes Licht eine untergeordnete Rolle gespielt haben (SELLARO et al., 2010). Auch die Aktivierung von Phytochromen wird vermutlich nicht ausschlaggebend gewesen sein, da, obwohl das supplementierte kurzwellige Rotlicht nicht dem Absorptionsmaximum der Phytochrome entspricht, diesem näher liegt als das kurzwellige Grünlicht. Möglicherweise ist die Funktion der Anthocyane als wichtiger Absorber des grünen Spektralbereichs relevant, welcher zugleich nur geringfügig durch photosynthetisch aktive Pigmente absorbiert wird (MERZLYAK und CHIVKUNOVA, 2000; PIETRINI et al., 2002; PIETRINI und MASSACCI, 1998; SMILLIE und HETHERINGTON, 1999). Im Vergleich zu Blau- und Rotlicht wird Grünlicht deswegen weniger in den oberen epidermalen Schichten und Palisadenmesophyll absorbiert und dringt stärker in das

Parenchym ein (SUN et al., 1998; VOGELMANN und EVANS, 2002). Da die Absorptionseigenschaften der Chlorophylle im Grünlichtbereich stark sinken und auch die Carotinoide nur im kurzwelligen Grünlichtbereich einen Einfluss haben (Abbildung 2.14), sind Anthocyane wichtig für den Schutz vor lichtbedingten Schädigungen durch den grünen Spektralbereich (MERZLYAK und CHIVKUNOVA, 2000; PIETRINI et al., 2002; PIETRINI und MASSACCI, 1998; SMILLIE und HETHERINGTON, 1999). Folglich ist es denkbar, dass eine Erhöhung des tiefer eindringenden Grünlichts Reaktionen induziert, deren Produkte eine Signalkaskade initiieren, die in einer Steigerung der Anthocyanproduktion resultiert. Eine solche, photorezeptorenunabhängige Induktion der Synthese antioxidativ wirksamer Substanzen wird auch von GALVEZ-VALDIVIESO et al. (2009) und PAGE et al. (2012) vermutet, beruhend auf einer Signalübertragung als Resultat einer übermäßigen Anregungsenergie, via Veränderungen des Redoxstatus von Photosynthese-Komponenten oder ROS Produktion. Neben einem möglichen Einfluss der Temperatur können die vergleichsweise hohen Anthocyan-gehalte bei einer nächtlichen Zusatzbestrahlung auch darauf begründet sein, dass eine COP1-vermittelte Ubiquitinierung und Degradierung der MYB Transkriptionsfaktoren PAP1 und PAP2, positive Regulatoren der Anthocyan-synthese (LI et al., 2012c; MAIER et al., 2013), in Dunkelheit durch die Zusatzbestrahlung vermieden wurde (MAIER et al., 2013). Für die COP1-Inaktivierung sind nur bestimmte Spektralbereiche relevant, die in den Absorptionsspektren der Phytochrome und Cryptochrome liegen. Dazu zählen neben den Blaulichtbereichen auch das Rotlicht und, in geringerem Maße, auch das kurzwellige Grünlicht (siehe Abschnitt 2.2.2.2).

Zusammenfassend deuten die unterschiedlichen Anthocyan-gehalte in den einzelnen Versuchsreihen einen Einfluss verschiedener Kultivierungsbedingungen, insbesondere auch der Temperatur, an. Eine zusätzliche Bestrahlung mit LEDs hatte tendenziell einen positiven Effekt, wobei das kurzwellige Grünlicht die höchste anthocyansteigernde Wirkung hatte. Dies scheint zunächst überraschend, ist aber durchaus aufgrund neuer Erkenntnisse anderer Forschungsgruppen zu erklären. Trotz der deutlichen Anthocyan-gehaltssteigerungen bei einer Supplementierung mit kurzwelligen Grünlicht wäre auch bei einer durchschnittlichen Gehaltserhöhung von 113% ein Verzehr von ca. 410 g *P. odorata* erforderlich, um die Aufnahmemenge bei Einhaltung der „5-a-day“-Regel⁵ zu erreichen.

5.1.7 Mineralstoffe

Zusätzlich zu den Bestimmungen organischer Inhaltsstoffe wurden in den Versuchsreihen „KK13“ und „GwH13“ Gehalte ausgewählter anorganischer Inhaltsstoffe analysiert. Da diese in den Pflanzen weder synthetisiert noch abgebaut werden, müssen in Hinblick auf die Mineralstoff-gehalte andere Aspekte berücksichtigt werden als bei den organischen Inhaltsstoffen.

⁵ Für Anthocyane liegt derzeit keine Aufnahmeempfehlung vor. Die angegebenen Werte beziehen sich auf eine Studie von WILLIAMSON und HOLST (2008), die eine durchschnittliche Anthocyan-aufnahmemenge berechneten anhand der „5-a-day“-Regel (5 Portionen Obst und Gemüse am Tag) (siehe Abschnitt 2.4.2.3)

Ausschlaggebend ist die Aufnahme der Nährstoffe. Erhöhungen können aus einem gesteigerten Bedarf resultieren, der aufgrund des Wachstums der Pflanzen bzw. Bildung von Biomasse entsteht. Diesbezüglich hat das Licht als Energiequelle für die Photosynthese eine zentrale Funktion. Als weiterer Einflussfaktor gilt die Geschwindigkeit der Biomassebildung im Verhältnis zur Mineralstoffaufnahme. Eine nicht-proportionale Mineralstoffaufnahme kann geringeren Mineralstoffkonzentrationen in Bezug auf die Trockenmasseakkumulation resultieren, bekannt als Verdünnungseffekt (JARRELL and BEVERLY, 1981; MARLES, 2017; MCGRATH, 1985). In Anlehnung an RIEDELL (2010) wurden die bestimmten Mineralstoffkonzentrationen [mg/ g TM] in Zusammenhang gesetzt mit der Trocken-masseakkumulation [g/ Pflanze] (Tabelle 5.29). Negative Korrelationskoeffizienten weisen auf eine Verringerung der jeweiligen Mineralstoffkonzentration bei einer Erhöhung der Trockenmasse und einen Verdünnungseffekt hin (MARLES, 2017).

Tabelle 5.29: Zusammenhang zwischen Mineralstoffgehalten (N=Nitrat, P=Phosphor, K=Kalium, Mg=Magnesium, Ca=Calcium, Fe=Eisen) und dem Nährlösungsverbrauch bzw. der Trockenmasse für die Versuchsreihen „KK13“ und „GwH13“ in *P. odorata*, kultiviert in der Klimakammer bzw. im Gewächshaus mit Lichtmodifikationen durch zusätzliche LED-Beleuchtung oder photosensitive Folien; angegeben sind Korrelationskoeffizienten nach Pearson

	Nitrat	P	K	Mg	Ca	Fe
Nährlösungsverbrauch [ml/Pflanze]	0,74	0,77	0,86	0,87	0,83	0,88
Trockenmasse [g/Pflanze]	0,02	-0,51	-0,26	0,65	-0,37	-0,37

Fett geschrieben: signifikant ($P \leq 0.05$)

Während bei Calcium (Abbildung 5.14), Eisen, Kalium und Phosphor signifikant negative Korrelationskoeffizienten einen Verdünnungseffekt andeuten, führte eine steigende Biomasseakkumulation zu einer Erhöhung des Magnesiumgehalts, durch JARRELL und BEVERLY (1981) als Synergieeffekt bezeichnet (Abbildung 5.15).

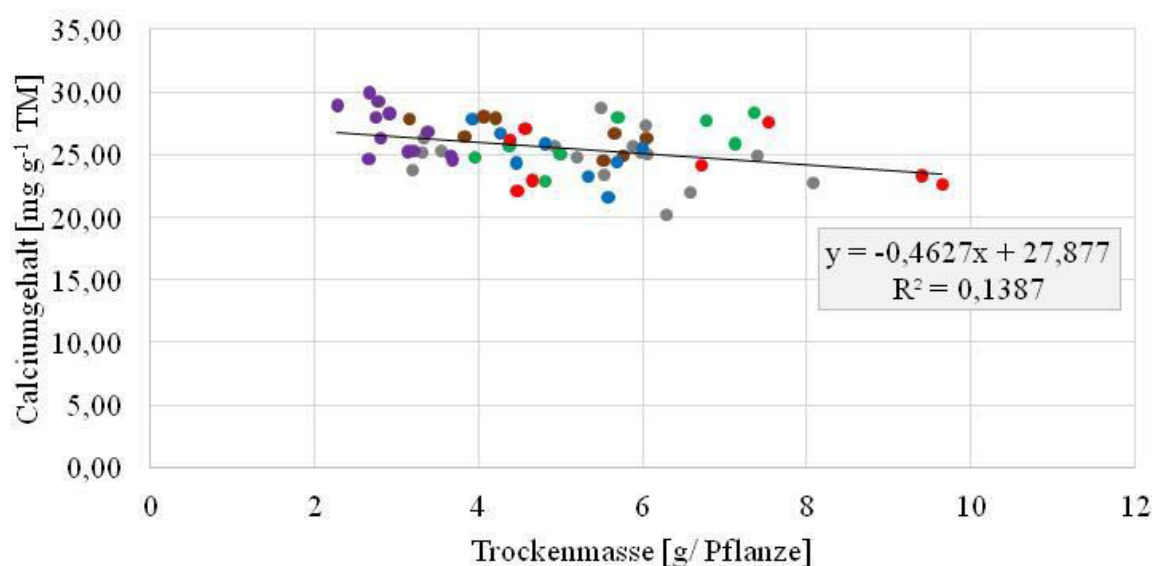


Abbildung 5.14: Zusammenhang zwischen Trockenmasse [g/ Pflanze] und dem Calciumgehalt [mg g⁻¹ TM] in den Versuchsreihen „KK13“ und „GwH13“; grau: FL/ NL, blau: FL+B/ NL+B, grün: FL+G/ NL+G, rot: FL+R/ NL+R, lila: FL+PL/ NL+PL, rosa: FL+HMG/ NL+HMG; Linie: Regressionsgerade mit Regressionskoeffizienten (R^2) und Formel

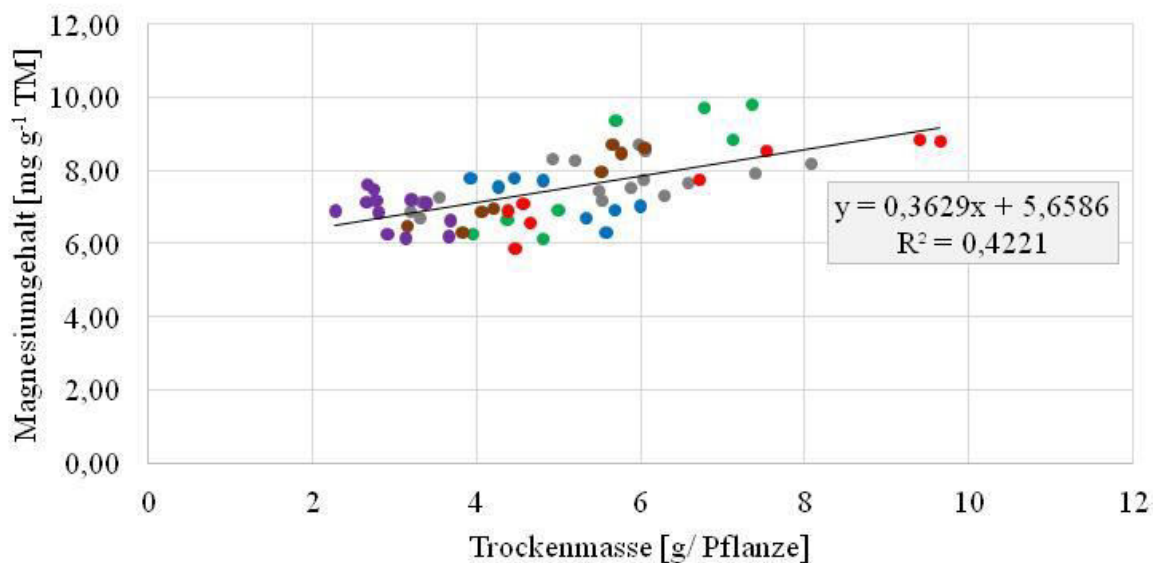


Abbildung 5.15: Zusammenhang zwischen Trockenmasse [g/ Pflanze] und dem Magnesiumgehalt [mg g⁻¹ TM] in den Versuchsreihen „KK13“ und „GwH13“; grau: FL/ NL, blau: FL+B/ NL+B, grün: FL+G/ NL+G, rot: FL+R/ NL+R, lila: FL+PL/ NL+PL, rosa: FL+HMG/ NL+HMG; Linie: Regressionsgerade mit Regressionskoeffizienten (R²) und Formel

Auch bei der passiven Aufnahme, abhängig von den Transpirationsströmen (NOVÁK und VIDOVIČ, 2003; OTTOSEN et al., 2002; SILBERBUSH et al., 2005; SILBERBUSH und BEN-ASHER, 2001) und resultierend in einer veränderten Wasserabsorptionsrate (ASTON und LAWLOR, 1979) ist eine indirekte Beeinflussung durch die Lichtbedingungen, aber auch durch andere Faktoren wie Temperatur, Wind und Luftfeuchtigkeit denkbar und teilweise belegt (DRAKE et al., 1970; GORHAM, 1987; MATTSSON et al., 1988; OTTOSEN et al., 2002; PONS et al., 2001). Signifikant positive Korrelationen zwischen den Mineralstoffgehalten (pro Pflanze) und dem Nährlösungsverbrauch (pro Pflanze) (Tabelle 5.29) sind ein Indiz für eine starke Beeinflussung der Mineralstoffgehalte durch die Transpirationsströme.

Nitrat

In der vorliegenden Arbeit wurde nicht der Gesamtstickstoffgehalt bestimmt, sondern der Nitratgehalt der Pflanzen, da dieser aufgrund verschiedener negativer Effekte auf die menschliche Gesundheit (siehe Abschnitt 2.4.2.4) ein qualitätsbestimmender Parameter ist. Der bestimmte Nitratgehalt lag zwischen 16,72-27,10 mg g⁻¹ TM in den Kontrollen und war im Gewächshaus geringer als in der Klimakammer. Bezogen auf durchschnittliche Trockenmassegehalte von 12,81% in der Klimakammer und 13,41% im Gewächshaus ergeben sich rechnerisch Gehalte von 270-347 mg 100 g⁻¹ FM für die Kontrollen der Klimakammer und 224 mg 100 g⁻¹ FM für die Gewächshausversuche. Damit liegen die Gehalte in den Gewächshauspflanzen unterhalb der Höchstwerte der EG-Verordnung Nr. 466/2001 für Spinat von 3000 bzw. 2500 mg Nitrat/ kg (1. Oktober – 31. März bzw. 1. April – 30. September) (EUROPÄISCHE KOMMISSION, 2005). Die Klimakammerpflanzen überschritten diesen Wert hingegen teilweise. Die Höchstwerte für Kopfsalat von 2500-4500 mg/ kg wurden bei beiden Standorten eingehalten.

In der **Klimakammer** zeigt ein Vergleich der Kontrollen einen positiven Effekt steigender Tageslichtsummen auf den Nitratgehalt (Tabelle 5.30). Zusätzliche Bestrahlungen mit **LEDs** beeinflussten den

Nitratgehalt tendenziell negativ, rote LEDs signifikant. Überdeckungen mit *photosелеktiven Folien* führten bei den Varianten HMG72% und PL57% zu tendenziellen Verringerungen des Nitratgehalts, bei der Variante PL40% hingegen zu einer tendenziellen Erhöhung (Tabelle 5.31).

Tabelle 5.30: Beeinflussung des Nitratgehalts [mg g^{-1} TM] von *P. odorata* durch LEDs: nach drei Wochen, kultiviert in der Klimakammer (Versuchsjahr 2013) unter kontrollierten Bedingungen; beschrieben werden die Gehalte in den LED-Varianten im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle

Lichtvariante*	LICHTBEDINGUNGEN		NITRATGEHALT***	
	PAR-Wert [$\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$]**	Tageslichtsumme [$\text{mol m}^{-2}\text{d}^{-1}$]**	[mg g^{-1} TM]	% Veränderungen gegenüber Kontrolle
FLb	81,17	4,68	21,07 \pm 2,16	
FL+B	87,96	5,07	18,52 \pm 2,22	-12,11%
FLg	113,1	6,51	21,80 \pm 1,35	
FL+G	109,35	6,30	18,53 \pm 3,40	-15,00%
FLr	157,31	9,06	27,10 \pm 5,74	
FL+R	149,50	8,61	15,66 \pm 1,27	-42,21%

*FL+R= Ergänzung der Grundbelichtung durch rote LEDs (zugehörige Kontrolle: FLr), FL+G= Ergänzung der Grundbelichtung durch grüne LEDs (zugehörige Kontrolle: FLg), FL+B= Ergänzung der Grundbelichtung durch blaue LEDs (zugehörige Kontrolle: FLb)

**Zu Beginn des Versuchszeitraums

***Angabe sind Mittelwerte und Standardabweichungen; unterschiedliche Buchstaben bezeichnen signifikante Unterschiede zwischen LED-Variante und zugehöriger Kontrolle, fehlende Buchstaben bedeuten keine signifikanten Unterschiede (Tukey-test, $P \leq 0.05$), $n=4$

Tabelle 5.31: Beeinflussung des Nitratgehalts [mg g^{-1} TM] von *P. odorata* durch eine Überdeckung mit photosелеktiven Folien: nach drei Wochen, kultiviert in der Klimakammer (Versuchsjahr 2013) unter kontrollierten Bedingungen; beschrieben werden die Gehalte in den Folien-Varianten im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle

Lichtvariante*	LICHTBEDINGUNGEN		NITRATGEHALT***	
	PAR-Wert [$\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$]**	Tageslichtsumme [$\text{mol m}^{-2}\text{d}^{-1}$]**	[mg g^{-1} TM]	% Veränderungen gegenüber Kontrolle
FLh1	113,1	6,51	21,80 \pm 1,35	
HMG72%	81,43	4,69	20,13 \pm 3,06	-7,66
FLp1	81,17	4,68	21,07 \pm 2,16	
PL57%	46,27	2,67	20,40 \pm 2,04	-3,20
FLp2	157,31	9,06	27,10 \pm 5,74	
PL40%	62,92	3,62	30,28 \pm 2,43	+11,73

* FL+HMG72%= Überdeckung der Pflanzen mit der Half Minus Green-Folie, erreichte Lichtintensität: 72% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLh1), FL+PL57%= Überdeckung der Pflanzen mit der Pale Lavender-Folie, erreichte Lichtintensität: 57% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLp1), FL+HMG55%= Überdeckung der Pflanzen mit der Half Minus Green-Folie, erreichte Lichtintensität: 55% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLh2), FL+PL40%= Überdeckung der Pflanzen mit der Pale Lavender-Folie, erreichte Lichtintensität: 40% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLp2),

** Zu Beginn des Versuchszeitraums

*** Angegeben sind Mittelwerte und Standardabweichungen; unterschiedliche Buchstaben bezeichnen signifikante Unterschiede zwischen Folien-Variante und zugehöriger Kontrolle, fehlende Buchstaben bedeuten keine signifikanten Unterschiede (Tukey-test, $P \leq 0.05$), $n=4$

Die Abbildung 5.16 bestätigt den positiven Zusammenhang zwischen Tageslichtsumme und Nitratgehalt in der Klimakammer. Deutlich lässt sich die negative Wirkung aller LED-Bestrahlungen, insbesondere der roten, erkennen, während die PL-Folie den Nitratgehalt tendenziell erhöhte.

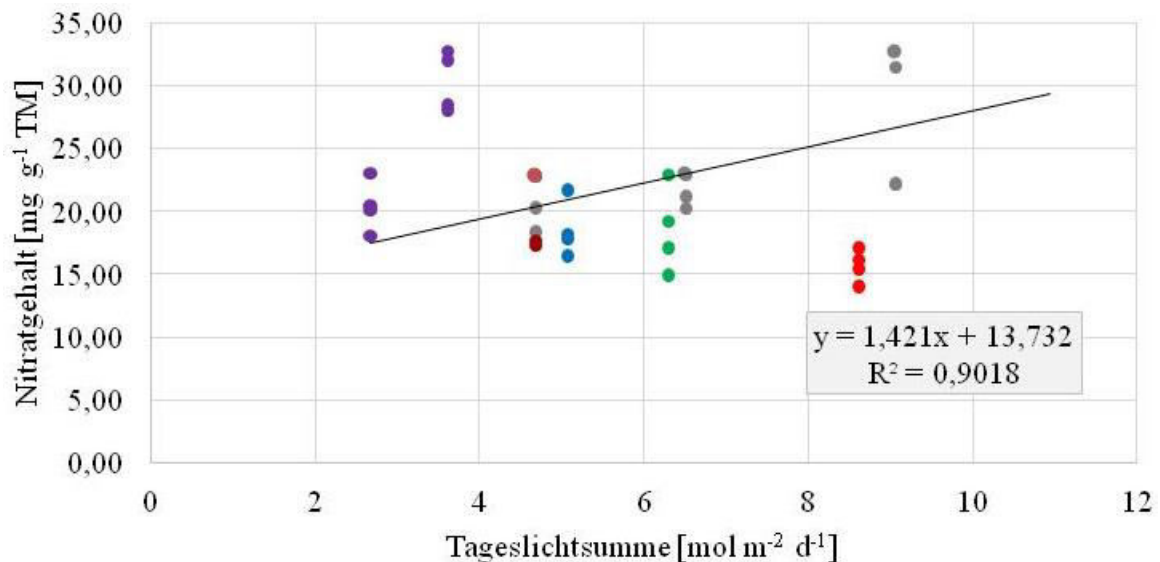


Abbildung 5.16: Zusammenhang zwischen Tageslichtsumme und dem Nitratgehalt [mg g⁻¹ TM] von *P. odorata*, kultiviert in der Klimakammer; Dargestellt sind Einzelwerte der Varianten (n=4); grau: FL, blau: FL+B, grün: FL+G, rot: FL+R, lila: FL+PL, dunkelrot: FL+HMG; Regressionsgerade mit Regressionskoeffizienten (R²) und Formel bezieht sich auf die Kontrollen (grau)

Durch die **LED**-Versuche im **Gewächshaus** wurde die negative Wirkung grüner und roter LEDs bestätigt (Tabelle 5.32). Blaue LEDs bewirkten hingegen eine signifikante Steigerung des Nitratgehalts im Vergleich zur Kontrolle. In den Versuchen mit photoselektiven Folien führten beide Folienvarianten zu signifikant geringeren Nitratgehalten.

Tabelle 5.32: Beeinflussung des Nitratgehalts [mg g⁻¹ TM] von *P. odorata* durch eine Zusatzbestrahlung mit LEDs (B=Blau, G=Grün, R=Rot) bzw. eine Überdeckung mit photoselektiven Folien (HMG= „Half minus green“-Folie; PL= „Pale Lavander“-Folie): nach drei Wochen, kultiviert im Gewächshaus (Versuchsreihe „GwH13“) mit natürlichem Licht

NITRATGEHALTE*					
LED-Versuche			Folienversuche		
Lichtvariante	[mg g ⁻¹ TM]	[%]	Lichtvariante	[mg g ⁻¹ TM]	[%]
NL	16,72 b ±1,56		NL	16,72 a ±1,56	
NL+B	24,16 a ±2,83	+44,5	NL+HMG	10,97 b ±0,49	-34,4
NL+G	11,70 c ±1,53	-30,0	NL+PL	10,14 b ±0,81	-39,4
NL+R	13,30 bc ±0,75	-20,5			

*Angegeben sind Mittelwerte und Standardabweichungen; kursiv geschrieben: prozentuale Veränderungen im Vergleich zur Kontrolle; unterschiedliche Buchstaben bezeichnen signifikante Unterschiede innerhalb einer Versuchsreihe zwischen Behandlungen, fehlende Buchstaben bedeuten keine signifikanten Unterschiede (Tukey-test, P≤0.05), n=4

Die Kontrollen in der Klimakammer deuten einen positiven Zusammenhang zwischen Nitratgehalt und Tageslichtsumme an, welcher durch die Korrelationskoeffizienten der Folienversuche im Gewächshaus bestätigt wird (Tabelle 5.33). Die Beeinflussung durch die spektrale Lichtzusammensetzung ist nicht eindeutig. Durch rote LEDs kam es teilweise zu signifikanten Verringerungen des Nitratgehalts. Diese spiegeln sich jedoch nicht in den Korrelationskoeffizienten wider. Durch grüne LEDs kam es ebenfalls zu einer Verringerung, die sich in der Versuchsreihe „GwH13“ in einer negativen Korrelation mit dem kurzwelligen Grünlichtanteil äußerte, sowie bei mehreren Versuchsreihen in positiven Korrelationen

des Nitratgehalts mit den BR:G- und B:G-Verhältnissen. Die gemittelten Korrelationskoeffizienten deuteten zudem einen rechnerisch positiven Zusammenhang mit dem langwelligen Rotlichtanteil und einen negativen Zusammenhang mit dem R:FR-Verhältnis an.

Tabelle 5.33: Zusammenhang zwischen Lichteigenschaften und dem Nitratgehalt in *P. odorata*, kultiviert in der Klimakammer bzw. im Gewächshaus mit Lichtmodifikationen durch zusätzliche LED-Beleuchtung oder photosensitive Folien; angegeben sind partielle Korrelationskoeffizienten nach Spearman (LED-Versuche im Gewächshaus) bzw. nach Pearson (LED-Versuche in der Klimakammer; Folien-Versuche in der Klimakammer und im Gewächshaus); die gemittelten Korrelationskoeffizienten wurden nach Fisher-Z-Transformation berechnet und zurücktransformiert

		TLS*	Korrelationskoeffizienten										
			Spektralbereichsanteile							Verhältnisse			
			401-450	451-500	501-550	551-600	601-650	651-700	B:R	BR:G	B:G	R:G	R:FR
LED	KK13	0,15	-0,09	0,01	0,14	0,56	-0,38	0,56	-0,02	-0,48	-0,32	-0,56	
	GwH13	-0,38	0,15	-0,32	-0,55	0,13	0,39	0,13	-0,32	0,79	0,49	0,76	
Folie	KK13	0,20	0,61	0,56	-0,35	-0,58	0,07	0,57	0,50	0,23	0,59	0,49	-0,60
	GwH13	0,87	0,01	-0,20	0,03	-0,01	-0,00	0,24	0,80	0,82	0,80	-0,78	-0,74
Ø		0,30	0,18	0,01	-0,20	0,02	0,03	0,39	0,30	0,45	0,45	-0,03	-0,68

Fett geschrieben: signifikant ($P \leq 0.05$)

*TLS= Tageslichtsumme

Im Gegensatz zu den betrachteten Mineralstoffen wird der Nitratgehalt in den Pflanzen beeinflusst von der Aufnahme des Nährstoffes und dessen Assimilation (MATT et al., 2001). Veränderungen beruhen auf Imbalancen zwischen den beiden Faktoren.

Die vorliegenden Versuchsreihen betrachtet, schien die **Tageslichtsumme** keinen Einfluss auf den Nitratgehalt gehabt zu haben. In vielen vorherigen Studien wurde jedoch übereinstimmend eine Verringerung des Nitratgehalts bei einem Anstieg der Lichtintensitäten bzw. im Vergleich von Tag- und Nachtzeit beobachtet (CÁRDENAS NAVARRO et al., 1998; CARRASCO und BURRAGE, 1992; LILLO, 1984; MATT et al., 2001; SCAIFE und SCHLOEMER, 1994; STEINGROVER et al., 1986). Dabei spielen zwei Aspekte eine Rolle: Licht fördert die Aufnahme von Nitrat (CHENG et al., 1992; MATT et al., 2001; SCAIFE und SCHLOEMER, 1994), jedoch auch die Nitrataassimilation (BECKER et al., 1992; CARRASCO und BURRAGE, 1992; LEA et al., 2006; LILLO, 1984; MATT et al., 2001; SCAIFE und SCHLOEMER, 1994; STEINGROVER et al., 1986). Daneben wird angemerkt, dass für den Stickstoffmetabolismus Energie in Form von Kohlenhydraten erforderlich ist (CHAMPIGNY, 1995) und Expressionen der Nitratreduktase und Nitritreduktase durch Sucrose erhöht werden (CHENG et al., 1992; SIVASANKAR et al., 1997). In Dunkelheit haben höhere Nitratgehalte eine funktionelle Bedeutung bei der Aufrechterhaltung des osmotischen Drucks (BLOM-ZANDSTRA und LAMPE, 1985). Eine Imbalance zwischen Nitrataufnahme und –assimilation, in Form einer stärkeren Zunahme der Nitrataassimilation im Vergleich zur Aufnahme, führt insgesamt zu geringeren Nitratgehalten (MATT et al., 2001; SCAIFE und SCHLOEMER, 1994). Bei manchen Pflanzen, beispielsweise in Blättern von *Capsicum annum* L. (DÍAZ-PÉREZ, 2013) und *Coffea arabica* L. (STEIMAN et al., 2011) konnte jedoch über einen bestimmten Bereich verschiedener Schattierungslevels eine Konstanz des Nitratgehalts beobachtet werden. In Blättern von *Capsicum annum* L. waren Schattierungen > 60% für einen Anstieg der Nitratkonzentration erforderlich (DÍAZ-PÉREZ,

2013). Auch wurde gezeigt, dass die Nitrataufnahme nicht proportional zur Sonnenbestrahlung verläuft, sondern sich stärker an dem diurnalen Rhythmus orientiert (BOUGOUL et al., 2000). Dass in den vorliegenden Versuchsreihen kein Zusammenhang zwischen der Tageslichtsumme und dem Nitratgehalt beobachtet werden konnte, bzw. dieser eher unerwartet positiv war, könnte folglich darauf begründet sein, dass die Variationen der Tageslichtsumme nicht ausreichend für einen bestimmaren Effekt waren. Ein Indiz dafür sind die Folienversuche in der Klimakammer, bei denen nur eine Schattierung von 60% (PL40%) zu einer signifikanten Erhöhung des Nitratgehalts führte. Von den anderen Ergebnissen abweichende, signifikant geringere Gehalte in den Pflanzen, die im Gewächshaus mit Folien überdeckt kultiviert wurden, könnten hingegen auf Veränderungen der spektralen Lichtzusammensetzung beruhen. Die negative Korrelation des Nitratgehalts mit dem **R:FR**-Verhältnis bestätigt die von WHITELAM und JOHNSON (1982) beschriebene Beteiligung von Phytochromen an der Regulation des Nitratgehalts. Zwar wurde in einigen Spezies eine phytochromevermittelte Induktion der Nitrataufnahme beobachtet (CHEN et al., 2016), jedoch fördert rotes Licht auch die Reduktion von Nitrat (BECKER et al., 1992; JONASSEN et al., 2008; RAO et al., 1980; WHITELAM und JOHNSON, 1982), wodurch speziesabhängig insgesamt eine Reduktion des Nitratgehalts beobachtet wurde (BLIZNIKAS et al., 2012; SAMUOLIENE et al., 2011, 2009). Dies würde wiederum die signifikanten Reduktionen des Nitratgehalts durch **rote LEDs** erklären. Ferner deuten andere Untersuchungen an, dass die nitratreduzierende Wirkung einer roten Bestrahlung von dem B:R-Verhältnis abhängt, wobei stärkere Nitratreduktionen tendenziell bei hohen Rotlichtanteilen von 75-87% beobachtet wurden (URBONAVIČIŪTĖ et al., 2007; WANLAI et al., 2013; WEN et al., 2009). Da in den Gewächshausversuchen eine signifikant positive Beeinflussung durch **blaue LEDs** gemessen wurde, wäre zu klären, ob blaues Licht unter bestimmten Umständen durch eine stärkere Förderung der Nitrataufnahme zu einer Erhöhung des Gehalts geführt hat. Diesbezüglich gibt es jedoch keine aussagekräftigen Untersuchungen.

Es ist auch denkbar, dass die Veränderungen des Nitratgehalts nicht direkt auf Lichtmodifikationen zurückzuführen sind, sondern auf Veränderungen anderer Parameter beruhten. Im Gegensatz zu den untersuchten Mineralstoffen zeigte sich keine Korrelation zwischen Trockenmasseakkumulation und Nitratkonzentration (Tabelle 5.29). Dies deutet darauf hin, dass die Nitrataufnahme proportional zur Biomassebildung verlief. Entscheidender für die Nitratkonzentrationen scheint hingegen der **Wassergehalt (%)** der Pflanzen gewesen zu sein. Für beide Versuchsstandorte wurden unter Berücksichtigung aller Varianten signifikant positive Korrelationen zwischen dem Wassergehalt (%) und Nitratgehalt berechnet („KK13“: $r=0,73$; „GwH13“: $r=0,44$) (Abbildung 5.17). Dieser Zusammenhang wurde bereits bei für andere Pflanzen beschrieben (DAPOIGNY et al., 2000; LOUDET et al., 2003; ROBIN et al., 1999) und wird erklärt anhand der osmotischen Eigenschaften des Nitrats (MCINTYRE, 1997) und seiner Funktion bei der Regulation des osmotischen Drucks (BLOM-ZANDSTRA und LAMPE, 1985; STEINGROVER et al., 1986). Die Aufrechterhaltung einer Nitrathomöostase durch eine Anpassung des Nitratgehalts an den Wassergehalt ist deswegen denkbar (DAPOIGNY et al., 2000; LOUDET et al., 2003; ROBIN et al., 1999). Interessanterweise wurde für die Varianten mit roter Zusatzbestrahlung dieser Zusammenhang nicht

beobachtet. Dadurch wird die Annahme bestätigt, dass rotes Licht durch eine gesteigerte Induktion der Nitrataassimilation den Nitratgehalt gesondert beeinflusst.

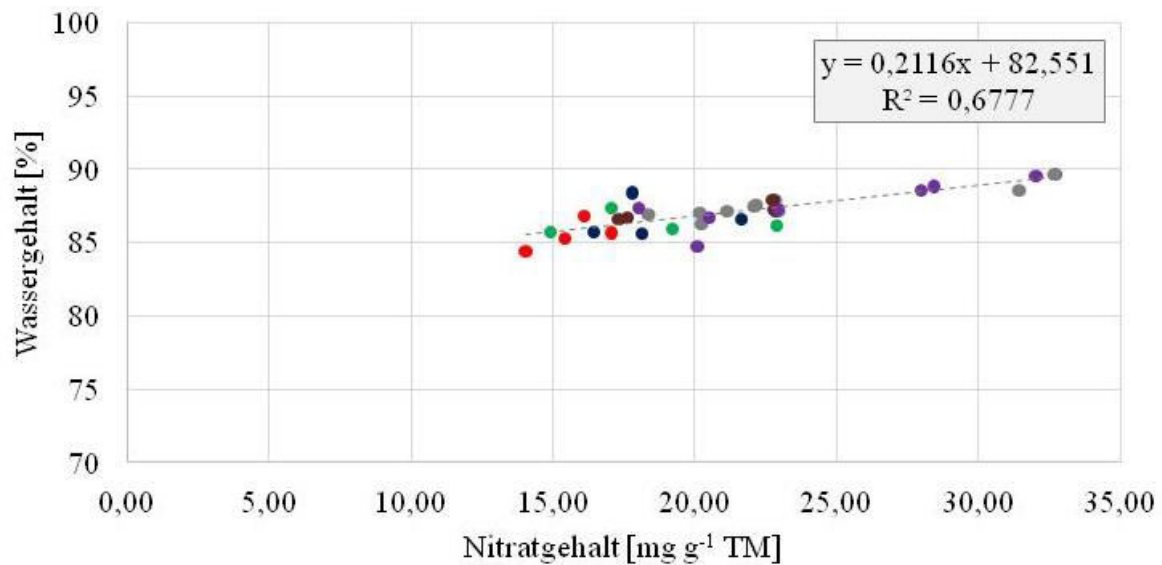


Abbildung 5.17: Zusammenhang zwischen Wassergehalt und dem Nitratgehalt; Versuch in der Klimakammer. grau: FL, blau: FL+B, grün: FL+G, rot: FL+R, lila: FL+PL, dunkelrot: FL+HMG; Linie: Regressionsgerade mit Regressionskoeffizienten (R^2) und Formel; Pearsonscher Korrelationskoeffizient für den Zusammenhang: $r=0,73$

Auch kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Veränderungen der Nitratkonzentration auf einer verstärkten passiven Aufnahme beruhten. Dies würde einen Zusammenhang mit dem Nährlösungsverbrauch implizieren. Diesbezüglich zeigten die Pflanzen der Varianten NL+G und NL+R („GWH13“) neben der geringsten Nitratkonzentration auch den geringsten Nährlösungsverbrauch. Auch die Kontrollen in der Klimakammer deuten diesbezüglich Parallelen an (Siehe Anhang 4). Ein erhöhter Bedarf an Nährlösung kann auf gesteigerte Transpirationsströme oder ein verstärktes Wachstum hindeuten. Transpirationsströme wurden nicht gemessen, jedoch das Wachstum bzw. die Biomassebildung und der Nährlösungsverbrauch. Die Variante NL+B hatte den höchsten Nährlösungsverbrauch (65,5 ml/ g FM) bei zugleich höchstem Nitratgehalt. Die Kontrollen mit 56,9 ml/ g FM, NL+R mit 54,0 ml/ g FM und NL+G mit 49,0 ml/ g FM hatten hingegen einen deutlich reduzierten Nährlösungsverbrauch bei signifikant geringeren Nitratkonzentrationen. Dies deutet eine überproportionale Aufnahme von Nährlösung im Verhältnis zur Frischmassebildung durch Pflanzen der Variante NL+B an.

Zusammenfassend kann kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Nitratgehalt und der Tageslichtsumme beschrieben werden. Vermutlich gab es einen indirekten Einfluss einer gesteigerten Nährlösungsaufnahme durch bestimmte Lichtbedingungen und einen Zusammenhang mit dem Wassergehalt. Im Gegensatz zu den anderen Mineralstoffen deutete sich jedoch eine Reduktion des Nitratgehaltes durch eine Erhöhung des Rotlichtanteils an. Diese Verringerungen des Nitratgehaltes sind auf Grund der insgesamt hohen Gehalte in *P. odorata* von großer Bedeutung und stellen eine Möglichkeit für die Regulation des Nitratgehaltes in Pflanzen dar. Die Nitratgehalte der Kontrollen befanden sich, bezogen auf die Höchstgehalte für Spinat und Kopfsalat der EG-Verordnung Nr. 466/2001, bereits auf einem hohen

Niveau. Eine Supplementierung mit blauen LEDs im Gewächshaus führte zu einer Erhöhung des Nitratgehaltes um 44,5% auf 351 mg 100 g⁻¹ FM, wodurch der Höchstgehalt für Spinat (2500 mg kg⁻¹ FM) deutlich überschritten würde, und bezogen auf Kopfsalat (3500 mg kg⁻¹ FM) der Gehalt ebenfalls grenzwertig ist (EG-Verordnung Nr. 466/2001). Auch bezogen auf eine Höchstaufnahmemenge von 277,5 mg pro Tag (berechnet für eine Person mit 75 kg Körpergewicht) würde eine Nitrataufnahme von 351 mg bei Verzehr von 100 g *P. odorata* eine Überschreitung bedeuten. Auf diesem Hintergrund sollte die Wirkung blauer LEDs auf den Nitratgehalt durch weitere Untersuchungen bestätigt werden, und, bei weiteren positiven Resultaten, nitratreduzierende Maßnahmen eingeleitet werden. Geprüft werden könnten geringere Stickstoffkonzentrationen in der Nährlösung (MUÑOZ et al., 2008), andere Stickstoffquellen und Reduktion des Nitratgehalts der Nährlösung an den Tagen vor der Ernte (SANTAMARIA et al., 2001).

Phosphor

Der Phosphorgehalt von *P. odorata* lag in den Kontrollen zwischen 7,41-8,08 mg g⁻¹ TM, ohne standortbedingte Unterschiede. Bezogen auf durchschnittliche Trockenmassegehalte von 12,81% in der Klimakammer und 13,41% im Gewächshaus ergeben sich rechnerisch Gehalte von 95-104 mg 100g⁻¹ FM. Die Phosphorgehalte waren damit höher als in *Brassica rapa* (32 mg 100 g⁻¹, VAN JAARSVELD et al., 2014).

In der **Klimakammer** wurde der Phosphorgehalt kaum durch die Modifizierung der Lichtbedingungen beeinflusst (Tabelle 5.34, Tabelle 5.35). Der Vergleich der Kontrollen deutet einen leicht negativen Zusammenhang mit der Tageslichtsumme an. Rote **LEDs** führten im Vergleich zur entsprechenden Kontrolle zu einer signifikanten Verringerung des Phosphorgehalts (Tabelle 5.34).

Tabelle 5.34: Beeinflussung des Phosphorgehalts [mg g⁻¹ TM] von *P. odorata* durch eine Zusatzbestrahlung mit LEDs: nach drei Wochen, kultiviert in der Klimakammer (Versuchsjahr 2013) unter kontrollierten Bedingungen; beschrieben werden die Gehalte in den LED-Varianten im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle

Lichtvariante*	LICHTBEDINGUNGEN		PHOSPHORGEHALT ***	
	PAR-Wert [μmol m ⁻² s ⁻¹]**	Tageslichtsumme [mol m ⁻² d ⁻¹]**	[mg g ⁻¹ TM]	% Veränderungen gegenüber Kontrolle
FLb	81,17	4,68	7,93±0,30	
FL+B	87,96	5,07	7,90±0,18	-0,5
FLg	113,1	6,51	8,08±0,20	
FL+G	109,35	6,30	7,69±0,19	-4,8
FLr	157,31	9,06	7,41a ±0,52	
FL+R	149,50	8,61	5,87b ±0,49	-20,8

*FL+R= Ergänzung der Grundbelichtung durch rote LEDs (zugehörige Kontrolle: FLr), FL+G= Ergänzung der Grundbelichtung durch grüne LEDs (zugehörige Kontrolle: FLg), FL+B= Ergänzung der Grundbelichtung durch blaue LEDs (zugehörige Kontrolle: FLb)

**Zu Beginn des Versuchszeitraums

***Angabe sind Mittelwerte und Standardabweichungen; unterschiedliche Buchstaben bezeichnen signifikante Unterschiede zwischen LED-Variante und zugehöriger Kontrolle, fehlende Buchstaben bedeuten keine signifikanten Unterschiede (Tukey-test, P≤0.05), n=4

Tabelle 5.35: Beeinflussung des Phosphorgehalts [$\text{mg g}^{-1} \text{ TM}$] von *P. odorata* durch eine Überdeckung mit photosелеktiven Folien: nach drei Wochen, kultiviert in der Klimakammer (Versuchsjahr 2013) unter kontrollierten Bedingungen; beschrieben werden die Gehalte in den Folien-Varianten im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle

Lichtvariante*	LICHTBEDINGUNGEN		PHOSPHORGEHALT ***	
	PAR-Wert [$\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$]**	Tageslichtsumme [$\text{mol m}^{-2}\text{d}^{-1}$]**	[$\text{mg g}^{-1} \text{ TM}$]	% Veränderungen gegenüber Kontrolle
FLh1	113,1	6,51	8,08 \pm 0,20	
HMG72%	81,43	4,69	7,98 \pm 0,38	-1,18%
FLp1	81,17	4,68	7,93 \pm 0,30	
PL57%	46,27	2,67	7,99 \pm 0,44	+0,70%
FLp2	157,31	9,06	7,41 \pm 0,52	
PL40%	62,92	3,62	7,70 \pm 0,34	+3,91%

* FL+HMG72%= Überdeckung der Pflanzen mit der Half Minus Green-Folie, erreichte Lichtintensität: 72% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLh1), FL+PL57%= Überdeckung der Pflanzen mit der Pale Lavender-Folie, erreichte Lichtintensität: 57% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLp1), FL+HMG55%= Überdeckung der Pflanzen mit der Half Minus Green-Folie, erreichte Lichtintensität: 55% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLh2), FL+PL40%= Überdeckung der Pflanzen mit der Pale Lavender-Folie, erreichte Lichtintensität: 40% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLp2),

** Zu Beginn des Versuchszeitraums

*** Angegeben sind Mittelwerte und Standardabweichungen; unterschiedliche Buchstaben bezeichnen signifikante Unterschiede zwischen Folien-Variante und zugehöriger Kontrolle, fehlende Buchstaben bedeuten keine signifikanten Unterschiede (Tukey-test, $P \leq 0.05$), $n=4$

Der tendenziell negative Einfluss der Tageslichtsumme auf den Phosphorgehalt wird auch in Abbildung 5.18 dargestellt. Deutlich wird zudem ein negativer Effekt der roten Zusatzbeleuchtung, während anhand der anderen Varianten keine Beeinflussung durch die spektrale Lichtzusammensetzung angedeutet wird.

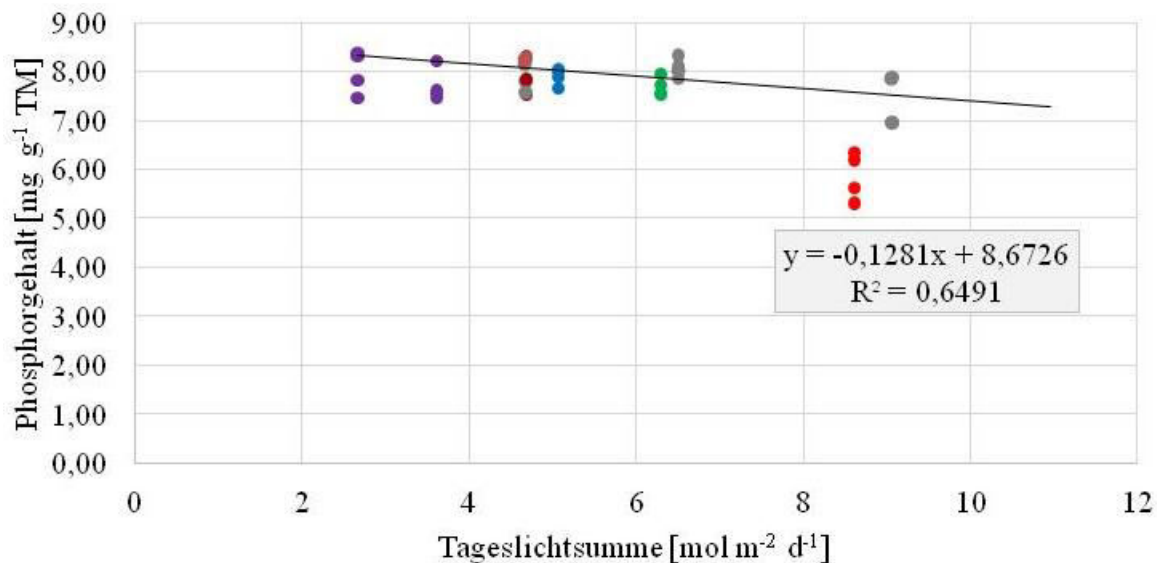


Abbildung 5.18: Zusammenhang zwischen Tageslichtsumme und dem Phosphorgehalt [$\text{mg g}^{-1} \text{ TM}$] von *P. odorata*, kultiviert in der Klimakammer; Dargestellt sind Einzelwerte der Varianten ($n=4$); grau: FL, blau: FL+B, grün: FL+G, rot: FL+R, lila: FL+PL, dunkelrot: FL+HMG; Regressionsgerade mit Regressionskoeffizienten (R^2) und Formel bezieht sich auf die Kontrollen (grau)

Im **Gewächshaus** führten **LED**- und **Folien**varianten zu keinen signifikanten Gehaltsveränderungen im Vergleich zur Kontrolle (Tabelle 5.36). Beim Vergleich der Varianten wurde bei NL+R ein signifikant höherer Gehalt bestimmt werden als bei NL+G.

Tabelle 5.36: Beeinflussung des Phosphorgehalts [mg g^{-1} TM] von *P. odorata* durch eine Zusatzbestrahlung mit LEDs (B=Blau, G=Grün, R=Rot) bzw. eine Überdeckung mit photoselktiven Folien (HMG= „Half minus green“-Folie; PL= „Pale Lavander“-Folie): nach drei Wochen, kultiviert im Gewächshaus (Versuchsreihe „GwH13“) mit natürlichen Licht

PHOSPHORGEHALTE*					
LED-Versuche			Folienversuche		
Lichtvariante	[mg g^{-1} TM]	[%]	Lichtvariante	[mg g^{-1} TM]	[%]
NL	7,86 ^{ab} ±0,11		NL	7,86±0,11	
NL+B	7,84 ^{ab} ±0,16	-0,25	NL+HMG	7,79±0,08	-0,81
NL+G	7,56 ^b ±0,08	-3,82	NL+PL	7,41±0,34	-5,72
NL+R	7,94 ^a ±0,22	+1,02			

*Angabe sind Mittelwerte und Standardabweichungen; kursiv geschrieben: prozentuale Veränderungen im Vergleich zur Kontrolle; unterschiedliche Buchstaben bezeichnen signifikante Unterschiede innerhalb einer Versuchsreihe zwischen Behandlungen, fehlende Buchstaben bedeuten keine signifikanten Unterschiede (Tukey-test, $P \leq 0.05$), $n=4$

Insgesamt wurde der Phosphorgehalt nur geringfügig durch die Lichtbedingungen beeinflusst. Trotz teils signifikanter Korrelationen (Tabelle 5.37) führen große Unterschiede zwischen den Versuchsreihen dazu, dass kaum Tendenzen abgeleitet werden können. In den meisten Versuchsreihen gab es positive Korrelationskoeffizienten für den Zusammenhang zwischen Phosphorgehalt und langwelligen Grünlichtanteil. Eine deutliche, negative Korrelation wird durch den gemittelten Korrelationskoeffizienten nur für das BR:G-Verhältnis abgebildet.

Tabelle 5.37: Zusammenhang zwischen Lichteigenschaften und dem Phosphorgehalt in *P. odorata*, kultiviert in der Klimakammer bzw. im Gewächshaus mit Lichtmodifikationen durch zusätzliche LED-Beleuchtung oder photoselktive Folien; angegeben sind partielle Korrelationskoeffizienten nach Spearman (LED-Versuche im Gewächshaus) bzw. nach Pearson (LED-Versuche in der Klimakammer; Folien-Versuche in der Klimakammer und im Gewächshaus); die gemittelten Korrelationskoeffizienten wurden nach Fisher-Z-Transformation berechnet und zurücktransformiert

		TLS*	Korrelationskoeffizienten										
			Spektralbereichsanteile						Verhältnisse				
			401-450	451-500	501-550	551-600	601-650	651-700	B:R	BR:G	B:G	R:G	R:FR
LED	KK13	-0,65	0,06	0,27	0,30	0,37	-0,69	0,37	0,20	-0,45	-0,17	-0,78	
	GwH13	0,31	0,46	-0,03	-0,33	0,47	0,26	0,47	-0,03	-0,79	0,74	0,79	
Folie	KK13	-0,33	-0,36	-0,34	0,29	0,38	-0,08	-0,36	-0,25	-0,19	-0,36	-0,33	0,36
	GwH13	0,69	-0,12	0,32	-0,00	-0,18	0,09	-0,26	-0,35	-0,30	-0,29	0,38	0,33
Ø		-0,03	-0,02	0,01	0,08	0,28	-0,10	-0,08	-0,15	-0,48	0,00	0,05	0,34

Fett geschrieben: signifikant ($P \leq 0.05$)

*TLS=Tageslichtsumme

Aufgrund der unterschiedlichen Ergebnisse beider Versuchsstandorte liefert die vorliegende Arbeit bezüglich einer möglichen Beeinflussung des Phosphorgehaltes durch die Tageslichtsumme keine eindeutigen Ergebnisse. Zumindest in der Klimakammer deuten die Ergebnisse einen negativen Zusammenhang an. Auch in anderen Studien gibt es, trotz der Beteiligung von Phosphor an der Photosynthese, bislang nur wenige Hinweise darauf, dass höhere Lichtintensitäten zu einer Steigerung der Phosphorkonzentration in Blättern führen. Im Gegenteil wurde in Blättern von *Prunus persica* L. Batsch (GAU-DILLERE und MOING, 1992), *Coffea arabica* (STEIMAN et al., 2011) und *Paspalum notatum* (WILSON et al., 1990) keine Veränderung der Phosphorkonzentration durch Kultivierung in direkten Sonnenlicht oder Schatten festgestellt, was ein Hinweis darauf sein kann, dass die Lichtbedingungen keinen direkten Effekt auf den Phosphorgehalt von Blättern hatten. In Blättern von Tomatenpflanzen (EL-GIZAWY et

al., 1992; GENT, 2019), Kakaopflanzen (BURRIDGE et al., 1964a), Kiefergewächsen (BLAIR et al., 2007), Gräsern (MCEWEN und DIETZ, 2007) sowie in Hülsenfrüchten (WONG, 1990) wurde hingegen eine Erhöhung des Phosphorgehalts durch steigende Schattierung und somit verringerten Lichtintensitäten gemessen.

Die vorliegenden Ergebnisse deuten durch den tendenziell positiven Zusammenhang mit dem langwelligen Grünlichtanteil und dem tendenziell negativen Zusammenhang mit dem BR:G-Verhältnis eine Beeinflussung des Phosphorgehalts durch die spektrale Lichtzusammensetzung an, die charakteristisch für Schattenbedingungen ist. Es gibt jedoch kaum Studien, in denen entsprechende Untersuchungen durchgeführt wurden. Bei *Tagetes patula* bewirkte eine zusätzliche Bestrahlung mit roten oder blauen LEDs keine Veränderungen des Phosphorgehalts (SAMS et al., 2016), in Brokkolisprossen führte eine Bestrahlung mit LEDs mit einem vergleichsweise hohen Rotlichtanteil zu einer Erhöhung des Gehalts (KOPSELL et al., 2014), eine zusätzliche Bestrahlung mit roten LEDs bei einer blauen Grundbelichtung hingegen zu einer Verringerung (KOPSELL und SAMS, 2013). Bei letzterer Studie bleibt jedoch ungeklärt, ob das zusätzliche Rotlicht den verringernenden Effekt bewirkte oder die deutlich erhöhte Lichtintensität.

Abgesehen von Korrelationen mit dem langwelligen Grünlichtanteil und dem BR:G-Verhältnis, konnten in der vorliegenden Arbeit nur wenige Unterschiede durch die veränderten Lichtbedingungen festgestellt werden. Daher würden die Ergebnisse die Studien von GAUDILLERE und MOING (1992), SAMS et al. (2016) und WILSON et al. (1990) bestätigen. Die Bewertung der roten Zusatzbestrahlung mit einer negativen Wirkung in der Klimakammer und einem positiven Effekt im Gewächshaus ist unklar. Eventuell sind Veränderungen des Phosphorgehalts jedoch nicht direkt auf die Lichtbedingungen zurückführbar, sondern resultieren aus der Geschwindigkeit der Biomassebildung. In jungen Blättern von *Larix laricina*, *Picea mariana*, *Betula papyrifera* und *Alnus crispa* wurde eine Abnahme der prozentualen Phosphorkonzentration bei steigender Biomasse festgestellt, ein sogenannter „Verdünnungseffekt“ (CHAPIN und KEDROWSKI, 1983; WILLIAMS, 1948). Steigende Blattmassen werden wiederum mit einer gesteigerten Photosyntheseleistung und höheren Lichtintensitäten assoziiert (YUNCONG et al., 2007), wodurch ein indirekter Effekt der Lichtintensität auf den Phosphorgehalt erklärt werden könnte. Auch in der vorliegenden Arbeit wurde ein negativer Zusammenhang zwischen Phosphorgehalt und Trockenmasse berechnet ($r = -0,51$; Tabelle 5.29).

Zusammenfassend lässt sich aus den Ergebnissen dieser Arbeit ableiten, dass der Phosphorgehalt vermutlich nicht direkt über die Lichtintensität oder spektrale Lichtzusammensetzung beeinflusst wurde. Vermutlich führten Schattenbedingungen aufgrund unterschiedlicher Geschwindigkeiten der Biomassebildung und Mineralstoffakkumulation zu einem Anstieg des Phosphorgehalts. Im Hinblick auf die Bedeutung für die Humanernährung ist eine Aussage schwierig. Phosphor ist ein essentieller Nährwert, wird in der westlichen Ernährung jedoch tendenziell zu viel aufgenommen und kann dadurch zu gesundheitlichen Problemen führen (siehe Abschnitt 2.4.2.4). Steigerungen der Phosphorgehalte sind deswegen aus Sicht der Humanernährung nicht oder kaum relevant.

Kalium

Die Kaliumgehalte in den Kontrollen lagen zwischen 37,56-40,90 mg g⁻¹ TM. Bei einem durchschnittlichen Trockenmassegehalt von 12,81% in der Klimakammer und 13,41% im Gewächshaus ergeben sich rechnerisch Gehalte von 481-524 mg 100g⁻¹ FM, die im Bereich der Kaliumgehalte von *Petroselinum crispum* (469 mg 100g⁻¹ FM, POKLUDA, 2003) liegen.

Tabelle 5.38: Beeinflussung des Kaliumgehalts [mg g⁻¹ TM] von *P. odorata* durch eine Zusatzbestrahlung mit LEDs: nach drei Wochen, kultiviert in der Klimakammer (Versuchsjahr 2013) unter kontrollierten Bedingungen; beschrieben werden die Gehalte in den LED-Varianten im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle

Lichtvariante*	LICHTBEDINGUNGEN		KALIUMGEHALT***	
	PAR-Wert [μmol m ⁻² s ⁻¹]**	Tageslichtsumme [mol m ⁻² d ⁻¹]**	[mg g ⁻¹ TM]	% Veränderungen gegenüber Kontrolle
FLb	81,17	4,68	37,56±1,14	
FL+B	87,96	5,07	37,59±0,19	+0,1
FLg	113,1	6,51	38,67±0,94	
FL+G	109,35	6,30	37,66±0,91	-2,6
FLr	157,31	9,06	40,90a ±2,49	
FL+R	149,50	8,61	35,41b ±3,15	-13,4

*FL+R= Ergänzung der Grundbelichtung durch rote LEDs (zugehörige Kontrolle: FLr), FL+G= Ergänzung der Grundbelichtung durch grüne LEDs (zugehörige Kontrolle: FLg), FL+B= Ergänzung der Grundbelichtung durch blaue LEDs (zugehörige Kontrolle: FLb)

**Zu Beginn des Versuchszeitraums

***Angabe sind Mittelwerte und Standardabweichungen; unterschiedliche Buchstaben bezeichnen signifikante Unterschiede zwischen LED-Variante und zugehöriger Kontrolle, fehlende Buchstaben bedeuten keine signifikanten Unterschiede (Tukey-test, P≤0.05), n=4

Tabelle 5.39: Beeinflussung des Kaliumgehalts [mg g⁻¹ TM] von *P. odorata* durch eine Überdeckung mit photoselktiven Folien: nach drei Wochen, kultiviert in der Klimakammer (Versuchsjahr 2013) unter kontrollierten Bedingungen; beschrieben werden die Gehalte in den Folien-Varianten im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle

Lichtvariante*	LICHTBEDINGUNGEN		KALIUMGEHALT***	
	PAR-Wert [μmol m ⁻² s ⁻¹]**	Tageslichtsumme [mol m ⁻² d ⁻¹]**	[mg g ⁻¹ TM]	% Veränderungen gegenüber Kontrolle
FLh1	113,1	6,51	38,67±0,94	
HMG72%	81,43	4,69	37,65±1,78	-2,6
FLp1	81,17	4,68	37,56±1,14	
PL57%	46,27	2,67	37,38±2,16	-0,4
FLp2	157,31	9,06	40,90±2,49	
PL40%	62,92	3,62	41,23±1,40	+6,6

* FL+HMG72%= Überdeckung der Pflanzen mit der Half Minus Green-Folie, erreichte Lichtintensität: 72% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLh1), FL+PL57%= Überdeckung der Pflanzen mit der Pale Lavender-Folie, erreichte Lichtintensität: 57% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLp1), FL+HMG55%= Überdeckung der Pflanzen mit der Half Minus Green-Folie, erreichte Lichtintensität: 55% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLh2), FL+PL40%= Überdeckung der Pflanzen mit der Pale Lavender-Folie, erreichte Lichtintensität: 40% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLp2),

** Zu Beginn des Versuchszeitraums

*** Angegeben sind Mittelwerte und Standardabweichungen; unterschiedliche Buchstaben bezeichnen signifikante Unterschiede zwischen Folien-Variante und zugehöriger Kontrolle, fehlende Buchstaben bedeuten keine signifikanten Unterschiede (Tukey-test, P≤0.05), n=4

Die Kaliumgehalte in der **Klimakammer** erhöhten sich tendenziell mit steigenden Tageslichtsummen der Grundbelichtung (Tabelle 5.38). Eine Bestrahlung mit blauen und grünen **LEDs** hatte keinen Effekt, rote LEDs bewirkten eine signifikante Verringerung. Eine Überdeckung mit **photoselktiven Folien**

hatte keinen signifikanten Einfluss auf den Kaliumgehalt in der Klimakammer (Tabelle 5.39). Eine tendenzielle Steigerung wurde bei der Variante PL40% beobachtet.

Der positive Zusammenhang zwischen Kaliumgehalt und Tageslichtsumme ist auch in Abbildung 5.19 dargestellt. Eine Beeinflussung durch die spektrale Lichtzusammensetzung wird in der Abbildung ebenfalls angedeutet mit einer positiven Wirkung des Lichtspektrums unter der PL-Folie und einem negativen Effekt roter LEDs.

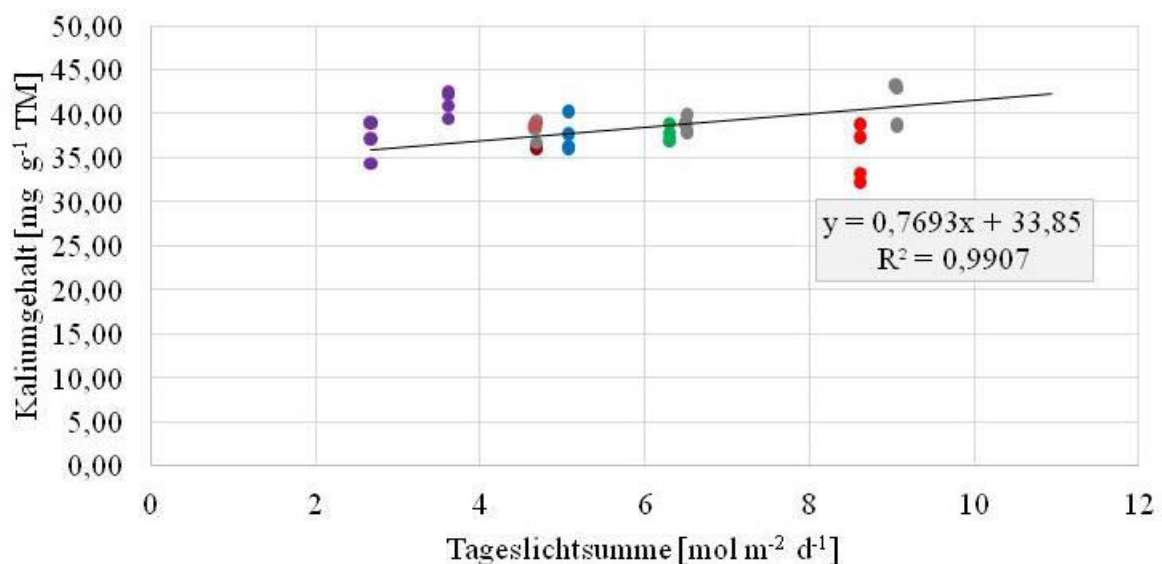


Abbildung 5.19: Zusammenhang zwischen Tageslichtsumme und dem Kaliumgehalt [mg g⁻¹ TM] von *P. odorata*, kultiviert in der Klimakammer; Dargestellt sind Einzelwerte der Varianten (n=4); grau: FL, blau: FL+B, grün: FL+G, rot: FL+R, lila: FL+PL, dunkelrot: FL+HMG; Regressionsgerade mit Regressionskoeffizienten (R²) und Formel bezieht sich auf die Kontrollen (grau)

Der Kaliumgehalt der Kontrolle im **Gewächshaus** war vergleichbar mit den Werten der Kontrollen aus der Klimakammer. **LEDs** bewirkten eine tendenzielle Erhöhung des Kaliumgehalts, welche bei blauen und roten LEDs signifikant war (Tabelle 5.40). Überdeckungen mit **photoselaktiven Folien** hatten keinen Effekt auf die Kaliumgehalte.

Tabelle 5.40: Beeinflussung des Kaliumgehalts [mg g⁻¹ TM] von *P. odorata* durch eine Zusatzbestrahlung mit LEDs (B=Blau, G=Grün, R=Rot) bzw. eine Überdeckung mit photoselaktiven Folien (HMG= „Half minus green“-Folie; PL= „Pale Lavender“-Folie): nach drei Wochen, kultiviert im Gewächshaus (Versuchsreihe „GwH13“) mit natürlichen Licht

KALIUMGEHALTE*					
LED-Versuche			Folienversuche		
Lichtvariante	[mg g ⁻¹ TM]	[%]	Lichtvariante	[mg g ⁻¹ TM]	[%]
NL	38,90 ^b ±0,95		NL	38,9±0,95	
NL+B	41,66 ^a ±1,87	+7,1	NL+HMG	39,85±1,29	+2,4
NL+G	40,53 ^{ab} ±0,94	+4,2	NL+PL	40,1±0,71	+3,1
NL+R	42,55 ^a ±1,28	+9,4			

*Angegeben sind Mittelwerte und Standardabweichungen; kursiv geschrieben: prozentuale Veränderungen im Vergleich zur Kontrolle; unterschiedliche Buchstaben bezeichnen signifikante Unterschiede innerhalb einer Versuchsreihe zwischen Behandlungen, fehlende Buchstaben bedeuten keine signifikanten Unterschiede (Tukey-test, P≤0.05), n=4

Der positive Zusammenhang zwischen dem Kaliumgehalt der Kontrollen und den jeweiligen Tageslichtsummen in der Klimakammer wird durch die Gewächshausversuche nicht bestätigt (Tabelle 5.41).

Deswegen lässt sich durch den gemittelten Korrelationskoeffizienten nur eine leicht positive Tendenz ableiten. Der positive Effekt blauer LEDs auf den Kaliumgehalt im Gewächshaus wird durch die Folienversuche der Versuchsreihe „KK13“ bestätigt, bei denen eine signifikante Korrelation des kurzwelligen Blaulichtanteils mit dem Kaliumgehalt berechnet wurde. Insgesamt gab es bei den verschiedenen Versuchsreihen unterschiedliche Ergebnisse, sodass keine eindeutige Beeinflussung des Kaliumgehalts durch die gewählten Lichtbedingungen abgeleitet werden kann. Bestätigt wird dies durch die vergleichbaren Kaliumgehalte in den Kontrollen der Klimakammer- und Gewächshausversuche.

Tabelle 5.41: Zusammenhang zwischen Lichteigenschaften und dem Kaliumgehalt in *P. odorata*, kultiviert in der Klimakammer bzw. im Gewächshaus mit Lichtmodifikationen durch zusätzliche LED-Beleuchtung oder photosensitive Folien; angegeben sind partielle Korrelationskoeffizienten nach Spearman (LED-Versuche im Gewächshaus) bzw. nach Pearson (LED-Versuche in der Klimakammer; Folienversuche in der Klimakammer und im Gewächshaus); die gemittelten Korrelationskoeffizienten wurden nach Fisher-Z-Transformation berechnet und zurücktransformiert

		TLS*	Korrelationskoeffizienten										
			Spektralbereichsanteile						Verhältnisse				
			401-450	451-500	501-550	551-600	601-650	651-700	B:R	BR:G	B:G	R:G	R:FR
LED	KK13	0,12	0,02	0,14	0,16	0,38	-0,48	0,38	0,11	-0,37	-0,18	-0,57	
	GwH13	0,78	0,25	0,34	-0,02	-0,25	-0,47	-0,25	0,34	-0,18	0,11	-0,32	
Folie	KK13	0,33	0,55	0,51	-0,33	-0,50	0,11	0,52	0,42	0,24	0,53	0,46	-0,54
	GwH13	-0,47	-0,01	-0,39	0,02	0,45	-0,22	0,32	-0,20	-0,27	-0,19	0,14	0,09
Ø		0,21	0,20	0,15	-0,05	0,02	-0,27	0,26	0,16	-0,15	0,08	-0,08	-0,25

Fett geschrieben: signifikant ($P \leq 0.05$)

*TLS=Tageslichtsumme

Auch die Literaturrecherche brachte keine eindeutigen Ergebnisse. Bei Tomaten- und Gurkenpflanzen wurde eine erhöhte Aufnahme durch steigende Temperaturen und **Lichtintensitäten** beobachtet, begründet auf einer erhöhten Transpirationsrate und einem parallelen Anstieg des Pflanzenwachstums und der Biomassebildung (GISLERØD und ADAMS, 1983). GENT (2019) bestätigt dies durch eine beobachtete, verringerte Kaliumaufnahme durch Tomatenpflanzen bei Schattierungen. Jedoch sagen diese Ergebnisse nichts über den Kaliumgehalt aus. Dieser wurde in Tomaten durch Schattierungen erhöht aufgrund ungleicher Verringerungen der Transpirationsrate und der Fruchtproduktion (GENT, 2019). Auch in Blättern von *Coffea arabica* (STEIMAN et al., 2011; TANADA, 1946), *Capsicum annum* L. (DÍAZ-PÉREZ, 2013) und in Hülsenfrüchten (WONG, 1990) wurden Erhöhungen des Kaliumgehalts bei Schattierungen beobachtet.

In der vorliegenden Arbeit wurde eine Korrelation zwischen Kaliumgehalt und der Aufnahme von Nährlösung berechnet ($r=0,86$), was eine passive Aufnahme des Kaliums durch Transpirationsströme vermuten lässt. Eine schwache, jedoch signifikant negative Korrelation mit der Trockenmasse kann weiterhin auf einen Verdünnungseffekt hinweisen. Möglicherweise kann dieser Zusammenhang jedoch dadurch erklärt werden, dass hohe Trockenmassen meist auch einen hohen Trockenmassegehalt implizieren. Kalium ist jedoch ein wichtiger Bestandteil der Vakuole und dort an der osmotischen Regulation beteiligt (LEIGH, 2001). Vor diesem Hintergrund wurde in Studien mit anderen Pflanzen bereits ein positiver Zusammenhang zwischen der Kaliumkonzentration und dem **Wassergehalt** beobachtet (LEIGH

und JOHNSTON, 1983a, 1983b), der auch für die vorliegenden Ergebnisse berechnet wurde ($r=0,65$ für „KK13“; $r=0,78$ für „GwH13“).

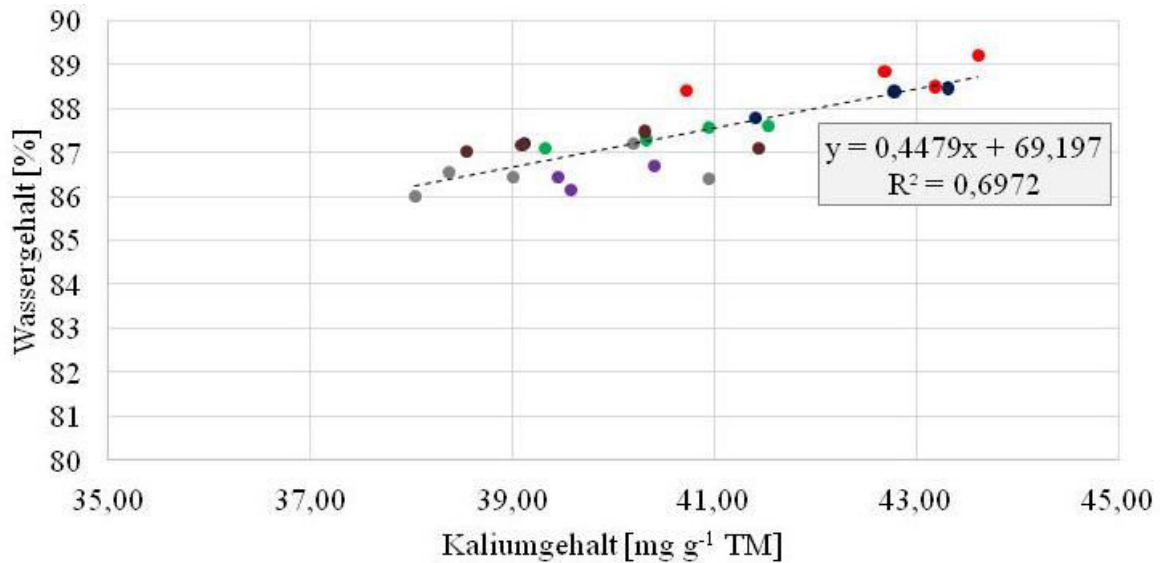


Abbildung 5.20: Zusammenhang zwischen Wassergehalt und dem Kaliumgehalt [mg g^{-1} TM] von *P. odorata* im Gewächshaus. grau: FL, blau: FL+B, grün: FL+G, rot: FL+R, lila: FL+PL, dunkelrot: FL+HMG; Linie: Regressionsgerade mit Regressionskoeffizienten (R^2) und Formel, Pearsonscher Korrelationskoeffizient für den Zusammenhang: $r=0,78$

Die nicht beobachtete Beeinflussung des Kaliumgehalts durch die spektrale Lichtzusammensetzung geht mit den Ergebnissen bislang veröffentlichter Studien einher. In *Tagetes patula* wurde bei Supplementierung des Sonnenlichtes durch verschiedene Spektralbereiche kein signifikanter Unterschied bestimmt. Tendenziell kam es jedoch zu einer Erhöhung des Kaliumgehalts, wobei ein höherer Rotlichtanteil einen stärkeren Effekt hatte als der Blaulichtanteil (SAMS et al., 2016). Dies könnte einen positiven Zusammenhang zwischen Kaliumgehalt und Lichtintensität bedeuten oder einen Einfluss des Blau- und insbesondere Rotlichts. Eine Steigerung des Kaliumgehalts durch Bestrahlung mit blauem und rotem Licht im Vergleich zur Fluoreszenzlampe wurde in Brokkolisprossen beobachtet (KOPSELL et al., 2014), wobei eine verringerte Lichtintensität durch Weglassen der roten LEDs den Gehalt signifikant steigerte (KOPSELL und SAMS, 2013).

Funktionell ließe sich eine positive Beeinflussung des Kaliumgehalts durch blaues und rotes Licht durch seine Beteiligung am stomatären Schließmechanismus erklären. Die Bildung von Schließzellen wird vermittelt durch Phytochrome (CASSON et al., 2009; CASSON und HETHERINGTON, 2014; KANG et al., 2009) und Cryptochrome (KANG et al., 2009), wodurch die Beobachtungen von KOPSELL et al. (2014), KOPSELL und SAMS (2013) und SAMS et al. (2016) und die Anstiege der Kaliumgehalte durch zusätzliche Bestrahlungen mit roten und blauen LEDs in der Versuchsreihe „GwH13“ begründet sein könnten. Die Stomatadichte nimmt mit steigender Lichtintensität zu (KNECHT und O’LEARY, 1972; WILD und WOLF, 1980) und würde somit die positive Beeinflussung des Kaliumgehalts durch die Tageslichtsumme in einigen Versuchsreihen erklären. Da es jedoch keine aussagekräftigen Angaben dazu gibt, welcher Anteil des Gesamtkaliums an dem Stomata-Schließmechanismus beteiligt ist, ist nicht klar, inwieweit dieser Aspekt relevant für den Gesamtkaliumgehalt ist.

Insgesamt lassen die durchgeführten Versuchsreihen vermuten, dass die Modifikationen der Lichtbedingungen vermutlich keinen oder nur einen geringen direkten Einfluss auf den Kaliumgehalt hatten. Wahrscheinlicher ist, dass der Kaliumgehalt an veränderte Wassergehalte angepasst wurde. Die erreichten Gehaltsveränderungen sind gering und deswegen nicht relevant für die Humanernährung.

Magnesium

Die Magnesiumgehalte in den Kontrollen lagen zwischen 6,99-8,47 mg g⁻¹ TM, ohne Unterschiede zwischen den Standorten. Bei einem durchschnittlichen Trockenmassegehalt von 12,81% in der Klimakammer und 13,41% im Gewächshaus ergeben sich rechnerisch Gehalte von 90-109 mg 100g⁻¹ FM, die höher sind als die Magnesiumgehalte in *Petroselinum crispum* (50,9 mg 100 g⁻¹, POKLUDA, 2003) und *Brassica rapa* (42 mg 100 g⁻¹, VAN JAARSVELD et al., 2014).

In der **Klimakammer** kann eine leichte, tendenziell positive, Beeinflussung durch die Tageslichtsumme der Grundbelichtung beobachtet werden (Tabelle 5.42). Zusätzliche **LEDs** bewirkten Gehaltssteigerungen, welche bei blauen und grünen LEDs signifikant waren.

Tabelle 5.42: Beeinflussung des Magnesiumgehalts [mg g⁻¹ TM] von *P. odorata* durch eine Zusatzbestrahlung mit LEDs: nach drei Wochen, kultiviert in der Klimakammer (Versuchsjahr 2013) unter kontrollierten Bedingungen; beschrieben werden die Gehalte in den LED-Varianten im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle

Lichtvariante*	LICHTBEDINGUNGEN		MAGNESIUMGEHALT***	
	PAR-Wert [μmol m ⁻² s ⁻¹]**	Tageslichtsumme [mol m ⁻² d ⁻¹]**	[mg g ⁻¹ TM]	% Veränderungen gegenüber Kontrolle
FLb	81,17	4,68	6,99 ^b ±0,27	
FL+B	87,96	5,07	7,70 ^a ±0,11	+10,2
FLg	113,1	6,51	8,46 ^b ±0,20	
FL+G	109,35	6,30	9,42 ^a ±0,43	+11,3
FLr	157,31	9,06	7,77 ±0,37	
FL+R	149,50	8,61	8,47 ±0,51	+9,0

*FL+R= Ergänzung der Grundbelichtung durch rote LEDs (zugehörige Kontrolle: FLr), FL+G= Ergänzung der Grundbelichtung durch grüne LEDs (zugehörige Kontrolle: FLg), FL+B= Ergänzung der Grundbelichtung durch blaue LEDs (zugehörige Kontrolle: FLb)

**Zu Beginn des Versuchszeitraums

***Angabe sind Mittelwerte und Standardabweichungen; unterschiedliche Buchstaben bezeichnen signifikante Unterschiede zwischen LED-Variante und zugehöriger Kontrolle, fehlende Buchstaben bedeuten keine signifikanten Unterschiede (Tukey-test, P≤0.05), n=4

Überdeckungen mit **photoselktiven Folien** hatten nur bei der Variante PL40% einen signifikant negativen Effekt auf den Magnesiumgehalt (Tabelle 5.43), während dieser in der Variante PL57% tendenziell höher war als in der zugehörigen Kontrolle.

Tabelle 5.43: Beeinflussung des Magnesiumgehalts [mg g^{-1} TM] von *P. odorata* durch eine Überdeckung mit photoselktiven Folien: nach drei Wochen, kultiviert in der Klimakammer (Versuchsjahr 2013) unter kontrollierten Bedingungen; beschrieben werden die Gehalte in den Folien-Varianten im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle

Lichtvariante*	LICHTBEDINGUNGEN		MAGNESIUMGEHALT***	
	PAR-Wert [$\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$]**	Tageslichtsumme [$\text{mol m}^{-2}\text{d}^{-1}$]**	[mg g^{-1} TM]	% Veränderungen gegenüber Kontrolle
FLh1	113,1	6,51	8,46 \pm 0,20	
HMG72%	81,43	4,69	8,44 \pm 0,34	-0,3
FLp1	81,17	4,68	6,99 \pm 0,27	
PL57%	46,27	2,67	7,35 \pm 0,24	+5,1
FLp2	157,31	9,06	7,77 ^a \pm 0,37	
PL40%	62,92	3,62	7,00 ^b \pm 0,17	-9,9

* FL+HMG72%= Überdeckung der Pflanzen mit der Half Minus Green-Folie, erreichte Lichtintensität: 72% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLh1), FL+PL57%= Überdeckung der Pflanzen mit der Pale Lavander-Folie, erreichte Lichtintensität: 57% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLp1), FL+HMG55%= Überdeckung der Pflanzen mit der Half Minus Green-Folie, erreichte Lichtintensität: 55% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLh2), FL+PL40%= Überdeckung der Pflanzen mit der Pale Lavander-Folie, erreichte Lichtintensität: 40% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLp2),

** Zu Beginn des Versuchszeitraums

*** Angegeben sind Mittelwerte und Standardabweichungen; unterschiedliche Buchstaben bezeichnen signifikante Unterschiede zwischen Folien-Variante und zugehöriger Kontrolle, fehlende Buchstaben bedeuten keine signifikanten Unterschiede (Tukey-test, $P \leq 0.05$), $n=4$

Die Abbildung 5.21 zeigt die leichten Gehaltssteigerungen bei höheren Tageslichtsummen in der Klimakammer. Daneben bestätigt die Abbildung die positive Wirkung grüner LEDs. Beim Vergleich mit Varianten ähnlicher Tageslichtsummen zeigt die Variante FL+B, trotz signifikant höherem Magnesiumgehalt als bei der zugehörigen Kontrolle, keinen Unterschied.

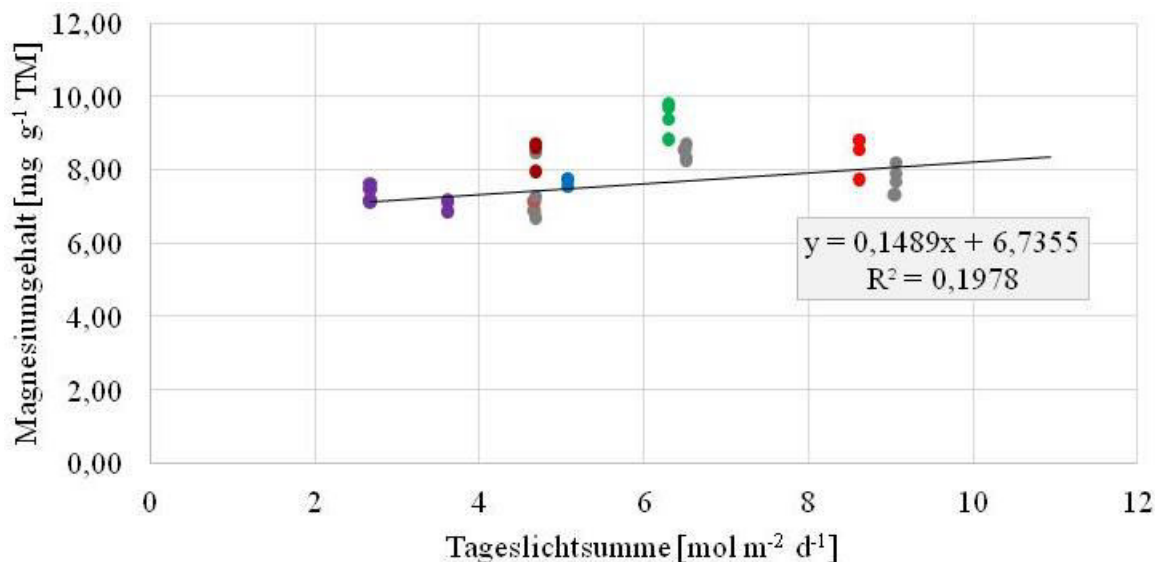


Abbildung 5.21: Zusammenhang zwischen PAR-Wert und dem Magnesiumgehalt [mg g^{-1} TM] von *P. odorata*, kultiviert in der Klimakammer; Dargestellt sind Einzelwerte der Varianten ($n=4$); grau: FL, blau: FL+B, grün: FL+G, rot: FL+R, lila: FL+PL, dunkelrot: FL+HMG; Regressionsgerade mit Regressionskoeffizienten (R^2) und Formel bezieht sich auf die Kontrollen (grau)

Im **Gewächshaus** bewirkten weder **LEDs**, noch eine Überdeckung mit **photoselktiven Folien**, eine Steigerung des Magnesiumgehalts (Tabelle 5.44). Dieser wurde hingegen durch grüne und rote LEDs, sowie durch Überdeckung mit beiden Folien signifikant verringert.

Tabelle 5.44: Beeinflussung des Magnesiumgehalts [mg g^{-1} TM] von *P. odorata* durch eine Zusatzbestrahlung mit LEDs (B=Blau, G=Grün, R=Rot) bzw. eine Überdeckung mit photoselktiven Folien (HMG= „Half minus green“-Folie; PL= „Pale Lavander“-Folie): nach drei Wochen, kultiviert im Gewächshaus (Versuchsreihe „GwH13“) mit natürlichen Licht

MAGNESIUMGEHALTE*					
LED-Versuche			Folienversuche		
Lichtvariante	[mg g^{-1} TM]	[%]	Lichtvariante	[mg g^{-1} TM]	[%]
NL	7,48a \pm 0,22		NL	7,48a \pm 0,22	
NL+B	6,73ab \pm 0,32	-10,03%	NL+HMG	6,65b \pm 0,31	-11,10%
NL+G	6,50b \pm 0,36	-13,10%	NL+PL	6,31b \pm 0,22	-15,65%
NL+R	6,60b \pm 0,54	-11,18%			

*Angabe sind Mittelwerte und Standardabweichungen; kursiv geschrieben: prozentuale Veränderungen im Vergleich zur Kontrolle; unterschiedliche Buchstaben bezeichnen signifikante Unterschiede innerhalb einer Versuchsreihe zwischen Behandlungen, fehlende Buchstaben bedeuten keine signifikanten Unterschiede (Tukey-test, $P \leq 0.05$), $n=4$

Die Korrelationskoeffizienten (Tabelle 5.45) deuten für die meisten Versuchsreihen einen positiven Zusammenhang zwischen Magnesiumgehalt und Tageslichtsumme an. Die Versuchsreihe „GwH13“(LEDs) ausgeklammert, lag der gemittelte Korrelationskoeffizient bei $r = 0,62$. Eine Beeinflussung durch Veränderungen der spektralen Lichtzusammensetzung lassen die gemittelten Korrelationskoeffizienten nicht erkennen.

Tabelle 5.45: Zusammenhang zwischen Lichteigenschaften und dem Magnesiumgehalt in *P. odorata*, kultiviert in der Klimakammer bzw. im Gewächshaus mit Lichtmodifikationen durch zusätzliche LED-Beleuchtung oder photoselktive Folien; angegeben sind partielle Korrelationskoeffizienten nach Spearman (LED-Versuche im Gewächshaus) bzw. nach Pearson (LED-Versuche in der Klimakammer; Folien-Versuche in der Klimakammer und im Gewächshaus); die gemittelten Korrelationskoeffizienten wurden nach Fisher-Z-Transformation berechnet und zurücktransformiert

		TLS*	Korrelationskoeffizienten										
			Spektralbereichsanteile							Verhältnisse			
			401-450	451-500	501-550	551-600	601-650	651-700	B:R	BR:G	B:G	R:G	R:FR
LED	KK13	0,33	-0,18	-0,00	0,57	-0,22	-0,24	-0,22	-0,08	-0,14	-0,06	-0,22	
	GwH13	-0,59	-0,07	-0,42	-0,59	-0,14	0,37	-0,14	-0,42	0,62	0,23	0,55	
Folie	KK13	0,40	0,35	-0,20	-0,21	0,47	0,47	-0,22	-0,58	0,34	-0,25	0,00	0,31
	GwH13	0,88	-0,03	0,48	-0,29	-0,34	0,03	-0,37	0,50	0,56	0,51	-0,45	-0,44
Ø		0,36	0,00	-0,02	-0,13	-0,05	0,17	-0,24	-0,14	0,37	0,12	-0,04	-0,07

Fett geschrieben: signifikant ($P \leq 0.05$)

*TLS= Tageslichtsumme

Der insgesamt positive Zusammenhang zwischen Magnesiumgehalt und **Tageslichtsumme** bestätigt die Ergebnisse anderer Studien, in denen ein gesteigerter Magnesiumbedarf als Reaktion auf höhere Lichtintensitäten beschrieben wird (CAKMAK und KIRKBY, 2008; MARSCHNER und CAKMAK, 1989; MURAGE et al., 1996; TEWARI et al., 2007; WONG, 1990a), um einer Beeinträchtigung des photosynthetischen Elektronentransports bei höheren Lichtintensitäten vorzubeugen (CAKMAK und MARSCHNER, 1992; MARSCHNER und CAKMAK, 1989). Durch den positiven Zusammenhang mit der Tageslichtsumme unterscheiden sich die Ergebnisse maßgeblich von den anderen Mineralstoffen, in denen ein negativer Zusammenhang bzw. kein Zusammenhang zwischen dem Mineralstoffgehalt und der Tageslichtsumme beobachtet wurde. Zugleich wurde im Gegensatz zu den anderen Mineralstoffen für Magnesium eine

positive Korrelation mit der Trockenmasse berechnet ($r=0,56$, Tabelle 5.29), wodurch ein Synergieeffekt angedeutet wird (JARRELL und BEVERLY, 1981). Dieser Zusammenhang wurde auch durch ÇAKMAK und MARSCHNER (1992) in Blättern von *Phaseolus vulgaris* L. beobachtet. Eine gesteigerte Magnesiumakkumulation bei höheren Tageslichtsummen und Biomassen könnte auf den, von ÇAKMAK und MARSCHNER (1992) und TEWARI et al. (2007) aufgeführten, Funktionen des Magnesiums bei der Vermeidung photooxidativer Schäden begründet sein. Bei einem Magnesiummangel wurde eine deutliche Verstärkung des antioxidativen Abwehrsystems beobachtet, ein Hinweis auf höhere Konzentrationen reaktiver Sauerstoffspezies. Möglicherweise ist eine Steigerung der Magnesiumkonzentration bei gesteigerten Tageslichtsummen als erforderliche Reaktion zu verstehen, um einem oxidativen Stress vorzubeugen. Die genauen Hintergründe sind jedoch nicht geklärt.

Ein Zusammenhang zwischen dem Magnesiumgehalt und den Chlorophyllgehalten (siehe Anhang 2.) konnte in der vorliegenden Arbeit nicht beobachtet werden. Jedoch liegt nur schätzungsweise 2,5-10,5% des gesamten Magnesiums in grünem Blattgemüse gebunden in Chlorophyll vor (BOHN et al., 2004). Zudem geht die, für Schattenbedingungen typische, Erhöhung der Chlorophyllgehalte nicht unbedingt mit einer Steigerung der Magnesiumgehalte einher, da eine Umverteilung des vorhandenen Magnesiums nicht zwangsläufig eine gesteigerte Aufnahme impliziert (DORENSTOUTER et al., 1985). Während die Beeinflussung durch die Tageslichtsumme relativ eindeutig war, gab es im Hinblick auf die spektrale Lichtzusammensetzung kaum Tendenzen. Lediglich das BR:G-Verhältnis korrelierte tendenziell positiv mit dem Magnesiumgehalt. Dies kann als Bestätigung des positiven Einflusses der Tageslichtsumme angesehen werden. Weiterhin kam es in der Versuchsreihe „KK13“ zu einer signifikanten Korrelation mit dem kurzwelligen Grünlichtanteil, bedingt durch den positiven Einfluss grüner LEDs. In der Versuchsreihe „GwH13“ (LEDs) ist diese Korrelation hingegen signifikant negativ. Auch die Literaturrecherche brachte diesbezüglich kaum Erkenntnisse. In Brokkolisprossen wurde ein positiver Einfluss von Blaulicht auf den Magnesiumgehalt beobachtet, während dieser durch eine Erhöhung des Grünlichtanteils sank (KOPSELL et al., 2014). Aus den vorliegenden Ergebnissen und denen von KOPSELL et al. (2014) lässt sich jedoch nicht ableiten, ob das Licht einen direkten Einfluss auf den Magnesiumgehalt hatte, oder die Reaktionen auf Anpassungen an veränderte Biomassen beruhten.

Zusammenfassend wurden die Magnesiumgehalte in *P. odorata* tendenziell positiv durch die Tageslichtsumme beeinflusst, während die spektrale Lichtzusammensetzung weniger relevant war. Unklar ist, ob das Licht den Magnesiumgehalt direkt beeinflusste, oder ob gesteigerte Trockenmassen, resultierend aus höheren Tageslichtsummen, zu einer Akkumulation von Magnesium geführt haben. Insgesamt waren die erreichten Gehaltsveränderungen jedoch gering und hatten keinen relevanten Einfluss auf die Verzehrsmengen, die zum Erreichen der Aufnahmeempfehlungen erforderlich sind (siehe Anhang, Tabelle 12.31).

Calcium

Da bislang keine Veröffentlichungen bezüglich der Mineralstoffgehalte in *P. odorata* vorliegen, können die bestimmten Calciumgehalte von 22,46-26,26 mg g⁻¹ TM in den Kontrollen nicht ratifiziert werden. In anderen Blattgemüsen wurden Calciumgehalte von 65 mg 100 g⁻¹ FM (*Brassica oleraceae*), 167 mg 100 g⁻¹ FM (*Petroselinum crispum*), 433 mg 100 g⁻¹ FM (*Apium graveolus* L., Blätter) (HALEVY et al., 1957) und 152 mg 100 g⁻¹ FM (*Brassica rapa*, VAN JAARSVELD et al., 2014) bestimmt. Bei durchschnittlichen Trockenmassegehalten von 12,81% in der Klimakammer und 13,41% im Gewächshaus ergeben sich rechnerisch Gehalte von 288-322 mg 100g⁻¹ FM für die Kontrollen in der Klimakammer und 352 mg 100g⁻¹ FM für die Gewächshausversuche. Somit liegen die Calciumgehalte von *P. odorata* im Vergleich mit anderen Blattgemüsen in einem hohen Bereich.

Die Calciumgehalte in den Kontrollen der **Klimakammern** lagen zwischen 22,46-25,13 mg g⁻¹ TM und deuten einen negativen Zusammenhang mit der Tageslichtsumme an (Tabelle 5.46, Abbildung 5.22). Grüne **LEDs** bewirkten eine signifikante Erhöhung des Calciumgehalts, welcher auch durch blaue und rote LEDs tendenziell positiv beeinflusst wurde. Eine signifikante Steigerung wurde in der Variante PL40% bestimmt (Tabelle 5.47).

Tabelle 5.46: Beeinflussung des Calciumgehalts [mg g⁻¹ TM] von *P. odorata* durch eine Zusatzbestrahlung mit LEDs: nach drei Wochen, kultiviert in der Klimakammer (Versuchsjahr 2013) unter kontrollierten Bedingungen; beschrieben werden die Gehalte in den LED-Varianten im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle

Lichtvariante*	LICHTBEDINGUNGEN		CALCIUMGEHALT***	
	PAR-Wert [μmol m ⁻² s ⁻¹]**	Tageslichtsumme [mol m ⁻² d ⁻¹]**	[mg g ⁻¹ TM]	% Veränderungen gegenüber Kontrolle
FLb	81,17	4,68	25,09±1,07	
FL+B	87,96	5,07	26,21±1,50	+4,45%
FLg	113,1	6,51	25,13 ^b ±0,36	
FL+G	109,35	6,30	27,48 ^a ±1,10	+9,35%
FLr	157,31	9,06	22,46±1,97	
FL+R	149,50	8,61	24,43±2,21	+8,78%

*FL+R= Ergänzung der Grundbelichtung durch rote LEDs (zugehörige Kontrolle: FLr), FL+G= Ergänzung der Grundbelichtung durch grüne LEDs (zugehörige Kontrolle: FLg), FL+B= Ergänzung der Grundbelichtung durch blaue LEDs (zugehörige Kontrolle: FLb)

**Zu Beginn des Versuchszeitraums

***Angaben sind Mittelwerte und Standardabweichungen; unterschiedliche Buchstaben bezeichnen signifikante Unterschiede zwischen LED-Variante und zugehöriger Kontrolle, fehlende Buchstaben bedeuten keine signifikanten Unterschiede (Tukey-test, P≤0.05), n=4

Tabelle 5.47: Beeinflussung des Calciumgehalts [mg g^{-1} TM] von *P. odorata* durch eine Überdeckung mit photoselktiven Folien: nach drei Wochen, kultiviert in der Klimakammer (Versuchsjahr 2013) unter kontrollierten Bedingungen; beschrieben werden die Gehalte in den Folien-Varianten im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle

Lichtvariante*	LICHTBEDINGUNGEN		CALCIUMGEHALT***	
	PAR-Wert [$\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$]**	Tageslichtsumme [$\text{mol m}^{-2}\text{d}^{-1}$]**	[mg g^{-1} TM]	% Veränderungen gegenüber Kontrolle
FLh1	113,1	6,51	25,13 \pm 0,37	
HMG72%	81,43	4,69	25,60 \pm 1,07	+1,88%
FLp1	81,17	4,68	25,09 \pm 1,07	
PL57%	46,27	2,67	26,98 \pm 2,42	+7,54%
FLp2	157,31	9,06	22,46 \pm 1,97	
PL40%	62,92	3,62	27,84 \pm 1,47	+23,93%

* FL+HMG72%= Überdeckung der Pflanzen mit der Half Minus Green-Folie, erreichte Lichtintensität: 72% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLh1), FL+PL57%= Überdeckung der Pflanzen mit der Pale Lavander-Folie, erreichte Lichtintensität: 57% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLp1), FL+HMG55%= Überdeckung der Pflanzen mit der Half Minus Green-Folie, erreichte Lichtintensität: 55% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLh2), FL+PL40%= Überdeckung der Pflanzen mit der Pale Lavander-Folie, erreichte Lichtintensität: 40% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLp2),

** Zu Beginn des Versuchszeitraums

*** Angegeben sind Mittelwerte und Standardabweichungen; unterschiedliche Buchstaben bezeichnen signifikante Unterschiede zwischen Folien-Variante und zugehöriger Kontrolle, fehlende Buchstaben bedeuten keine signifikanten Unterschiede (Tukey-test, $P \leq 0.05$), $n=4$

Der negative Zusammenhang zwischen Tageslichtsumme und Calciumgehalt geht auch aus der entsprechenden Regressionsgerade hervor (Abbildung 5.22). Eine Beeinflussung durch die spektrale Lichtzusammensetzung lässt sich aus den Ergebnissen der Klimakammerversuche hingegen nicht ableiten.

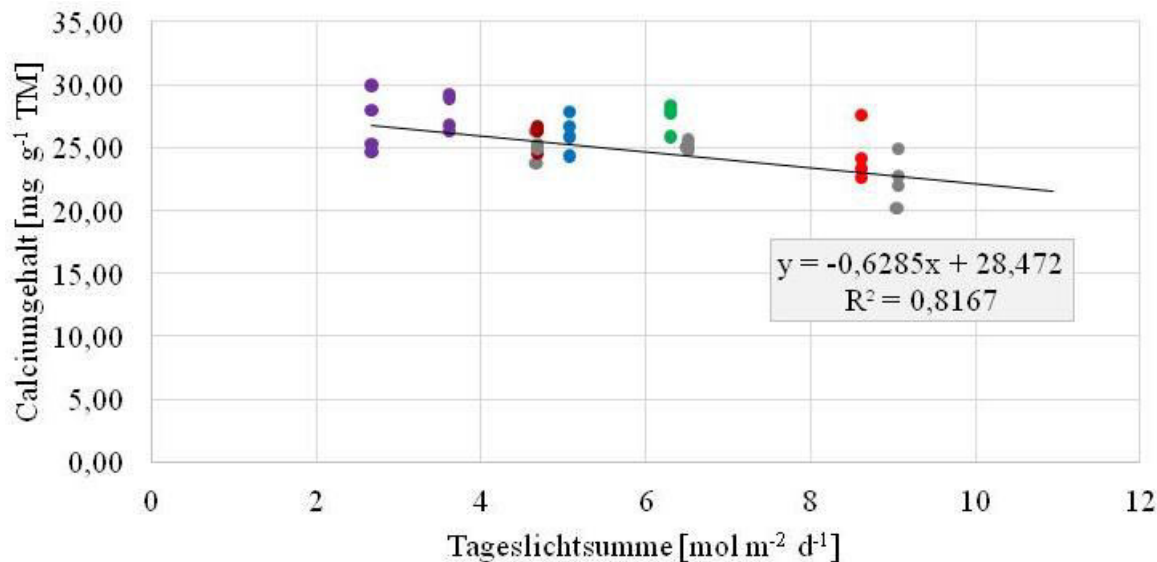


Abbildung 5.22: Zusammenhang zwischen Tageslichtsumme und dem Calciumgehalt [$\mu\text{g g}^{-1}$ TM] von *P. odorata*, kultiviert in der Klimakammer; Dargestellt sind Einzelwerte der Varianten ($n=4$); grau: FL, blau: FL+B, grün: FL+G, rot: FL+R, lila: FL+PL, dunkelrot: FL+HMG; Regressionsgerade mit Regressionskoeffizienten (R^2) und Formel bezieht sich auf die Kontrollen (grau)

Im **Gewächshaus** wurde in der Kontrolle ein Calciumgehalt von 26,26 mg g^{-1} TM bestimmt, der somit etwas höher lag als in der Klimakammer (Tabelle 5.48). Die Lichtmodifizierungen bewirkten keine signifikanten Veränderungen der Gehalte, die **LED**-Varianten deuten jedoch aufgrund der tendenziell geringeren Gehalte einen negativen Zusammenhang mit der Tageslichtsumme an.

Tabelle 5.48: Beeinflussung des Calciumgehalts [mg g⁻¹ TM] von *P. odorata* durch eine Zusatzbestrahlung mit LEDs (B=Blau, G=Grün, R=Rot) bzw. eine Überdeckung mit photoselktiven Folien (HMG= „Half minus green“-Folie; PL= „Pale Lavander“-Folie): nach drei Wochen, kultiviert im Gewächshaus (Versuchsreihe „GwH13“) mit natürlichen Licht

CALCIUMGEHALTE*					
LED-Versuche			Folienversuche		
Lichtvariante	[mg g ⁻¹ TM]	[%]	Lichtvariante	[mg g ⁻¹ TM]	[%]
NL	26,26±2,26		NL	26,26±2,26	
NL+B	23,73±1,70	<i>-9,65%</i>	NL+HMG	27,54±0,76	<i>+4,49%</i>
NL+G	24,63±1,22	<i>-6,21%</i>	NL+PL	25,76±1,72	<i>-1,99%</i>
NL+R	24,58±2,45	<i>-6,40%</i>			

*Angabe sind Mittelwerte und Standardabweichungen; kursiv geschrieben: prozentuale Veränderungen im Vergleich zur Kontrolle; unterschiedliche Buchstaben bezeichnen signifikante Unterschiede innerhalb einer Versuchsreihe zwischen Behandlungen, fehlende Buchstaben bedeuten keine signifikanten Unterschiede (Tukey-test, P≤0.05), n=4

Resultierend aus den negativen Zusammenhängen zwischen Calciumgehalten und Tageslichtsummen in der Klimakammer und den LED-Versuchen im Gewächshaus zeigt auch der gemittelte Korrelationskoeffizient einen negativen Zusammenhang mit der Tageslichtsumme, während keine eindeutige Aussage im Hinblick auf einen Zusammenhang mit der spektralen Lichtzusammensetzung möglich ist (Tabelle 5.49).

Tabelle 5.49: Zusammenhang zwischen Lichteigenschaften und dem Calciumgehalt in *P. odorata*, kultiviert in der Klimakammer bzw. im Gewächshaus mit Lichtmodifikationen durch zusätzliche LED-Beleuchtung oder photoselktive Folien; angegeben sind partielle Korrelationskoeffizienten nach Spearman (LED-Versuche im Gewächshaus) bzw. nach Pearson (LED-Versuche in der Klimakammer; Folien-Versuche in der Klimakammer und im Gewächshaus); die gemittelten Korrelationskoeffizienten wurden nach Fisher-Z-Transformation berechnet und zurücktransformiert

		TLS*	Korrelationskoeffizienten										
			Spektralbereichsanteile						Verhältnisse				
			401-450	451-500	501-550	551-600	601-650	651-700	B:R	BR:G	B:G	R:G	R:FR
LED	KK13	-0,46	0,05	0,16	0,29	-0,40	-0,11	-0,40	0,11	0,12	0,18	-0,03	
	GwH13	-0,36	-0,14	-0,29	-0,49	-0,41	0,09	-0,41	-0,28	0,27	-0,00	0,14	
Folie	KK13	-0,72	0,22	0,29	-0,19	-0,23	0,03	0,27	0,18	0,12	0,24	0,21	-0,24
	GwH13	0,13	0,61	-0,45	-0,66	0,42	-0,43	0,39	-0,43	-0,36	-0,47	0,49	0,51
Ø		-0,39	0,20	-0,09	-0,29	-0,16	-0,10	-0,04	-0,12	0,03	-0,03	0,22	0,16

Fett geschrieben: signifikant (P≤0.05)

*TLS= Tageslichtsumme

Der beobachtete negative Zusammenhang zwischen Calciumgehalt und Tageslichtsumme wurde mehrfach in Studien mit anderen Pflanzenspezies beschrieben (BLAIR et al., 1983; DÍAZ-PÉREZ, 2013; MCEWEN und DIETZ, 2007; STEIMAN et al., 2011; WONG, 1990). Vereinzelt wurden jedoch auch positive Zusammenhänge beobachtet (BURRIDGE et al., 1964; MONTANARO et al., 2006), erklärt durch die lichtinduzierte Synthese von Phenolen, die den Auxinabbau reduzieren und dadurch indirekt die Calciumakkumulation fördern (MONTANARO et al., 2006). Zudem wurde vielfach ein positiver Zusammenhang zwischen Calciumzufuhr bzw. -gehalt und Transpirationsrate beschrieben (AIRMAN und HOUTER, 1990; BIDDULPH et al., 1961; MONTANARO et al., 2006; XILOYANNIS et al., 2001). Da die Transpirationsrate auch durch die Absorption von Strahlung beeinflusst wird (AIRMAN und HOUTER, 1990), könnte dies ebenfalls einen positiven Zusammenhang zwischen Bestrahlungsstärke und Calciumgehalt erklären. In der vorliegenden Arbeit wurden die Transpirationsströme nicht untersucht, jedoch der Verbrauch

an Nährlösung. Dieser zeigte einen signifikant positiven Zusammenhang mit dem Calciumgehalt (Tabelle 5.29), ebenso wie mit der Tageslichtsumme (Gewächshaus: $r=0,70$; Klimakammer: $r=0,80$).

Durch eine negative Korrelation zwischen Calciumgehalt und Trockenmasse angedeutet ($r=-0,37$) (Tabelle 5.29), können die Ergebnisse möglicherweise durch unterschiedliche Geschwindigkeiten der Biomasseakkumulierung und Calciumaufnahme erklärt werden. Da die Biomasseakkumulierung durch die Lichtverfügbarkeit beeinflusst wurde (siehe Abschnitt 5.2.2), könnte dies ein Grund für den negativen Zusammenhang zwischen Tageslichtsumme und Calciumgehalt sein.

Weiterhin könnten höhere Calciumgehalte bei geringen Tageslichtsummen auch funktionell vorteilhaft sein. Bis zu 90% des Calciums in Pflanzen kann als Calciumoxalatkristalle gebunden vorliegen, auch wenn es speziesabhängig starke Schwankungen gibt (RADEK und SAVAGE, 2008; ZINDLER-FRANK et al., 2001). Deren Beeinflussung durch das Licht ist noch nicht abschließend geklärt. In *Peperomia glabella* wurden bei geringeren Lichtintensitäten größere Calciumoxalatkristalle bestimmt (KUO-HUANG et al., 2007), in *Lemna minor* wurde eine Erhöhung der Kristallanzahl um den Faktor vier bei Dunkelheit beobachtet (FRANCESCHI, 1987). Calciumoxalatkristallen werden verschiedene Funktionen zugeschrieben (siehe Abschnitt 2.3.2.1 und 2.3.3.2), unter anderem werden lichtsammelnde und lichtstreuende Eigenschaften mit der Kristallbildung assoziiert (GAL et al., 2012; KUO-HUANG et al., 2007). Diese werden mit einer Verringerung der Fluoreszenz und einer effizienteren Lichtnutzung in Verbindung gebracht (GAL et al., 2012). In *Cucumis sativus* L. zeigten Pflanzen mit höherem Calciumgehalt bei reduzierten Lichtintensitäten einen geringeren Abfall der Nettophotosyntheserate, der Ribulose 1,5-biphosphate Carboxylase-Aktivität und des Chlorophyll a:b-Verhältnisses (LIANG et al., 2009). Dies könnte, neben einer Aufkonzentrierung durch eine geringere Biomassebildung, eine verstärkte Einlagerung von Calcium als Calciumoxalatkristalle bei geringen Tageslichtsummen begründen, müsste jedoch durch weiterführende Versuche bestätigt werden. Zumindest durch das Vorkommen der zweiten Komponente, dem Oxalat, sollte die Kristallbildung nicht limitiert sein. Dieses liegt in der Familie der Polygonaceae tendenziell in hohen Gehalten vor (SIENER et al., 2006). In *P. odorata* wurde der vierthöchste Oxalatgehalt im Vergleich von 25 thailändischen, lokal verfügbaren Gemüsepflanzen, nachgewiesen (PHOSRITONG ET AL., 2014). Oxalate können in manchen Spezies fast vollständig als Calciumoxalat gebunden sein (BRUMAGEN und HIATT, 1966; GALLAHER, 1975). Eine Erhöhung des Oxalatgehalts in *Spinacia oleracea* L. durch eine Verringerung der Lichtintensität (PROIETTI ET AL., 2004), könnte ein weiteres Indiz einer vermehrten Calciumoxalatkristallbildung bei schwachen Lichtbedingungen sein. Hier würde sich jedoch die Frage stellen, ob die Kristalle gebildet werden, um die hohen Calciumgehalte bei geringen Tageslichtsummen zu binden, oder die funktionellen Eigenschaften der Calciumoxalatkristalle der Grund für eine verstärkte Bildung sind. Möglicherweise könnte in diesem Zusammenhang die Erhöhung des Calciumgehalts durch grüne LEDs in der Klimakammer darauf begründet sein, dass ein leicht erhöhter Grünlichtanteil charakteristisch für Schattenbedingungen ist und folglich präventiv durch eine Erhöhung des Calciumgehalts einer Verringerung der Photosyntheserate vorgebeugt werden soll.

Jedoch widersprechen die Korrelationskoeffizienten der anderen Versuchsreihen einer positiven Wirkung des kurzwelligen Grünlichtanteils.

Anhand der vorliegenden Ergebnisse kann keine Beeinflussung des Calciumgehalts in *P. odorata* durch die spektrale Lichtzusammensetzung festgestellt werden. Auch die wenigen Studien, in denen der Einfluss verschiedener Spektralbereiche auf den Calciumgehalt von Pflanzen untersucht wurde, liefern kein eindeutiges Ergebnis. In *Tagetes patula* wurde durch eine zusätzliche Beleuchtung mit Natriumhochdrucklampen oder LEDs keine signifikante Beeinflussung des Calciumgehalts erreicht (SAMS et al., 2016). In Brokkolikeimlingen konnte hingegen eine signifikante Erhöhung des Gehalts durch eine Veränderung der spektralen Lichtzusammensetzung, insbesondere einer Erhöhung des blauen und roten Anteils, beobachtet werden (KOPSELL et al., 2014), wobei eine zusätzliche Bestrahlung mit roten LEDs bei blauer Grundbelichtung zu einer Verringerung führte (KOPSELL und SAMS, 2013). Da die zusätzliche Bestrahlung mit roten LEDs in der Studie jedoch zugleich eine starke Erhöhung der Bestrahlungsstärke bedeutete, könnten die Beobachtungen auch auf einem negativen Zusammenhang zwischen Calciumgehalt und Bestrahlungsstärke begründet sein.

Die vorliegenden Ergebnisse deuten einen Zusammenhang zwischen Calciumgehalt und Tageslichtsumme an, wobei nicht geklärt ist, ob es sich um einen Verdünnungseffekt handelt, oder ein funktioneller Zusammenhang besteht. Die spektrale Lichtzusammensetzung hatte vermutlich keinen Einfluss. Aus Sicht der Humanernährung wären höhere Calciumgehalte wünschenswert. Steigerungen um 24% bei Schattierungen in der Klimakammer durch die PL-Folie (PL40%) können die Verzehrsmenge, die zur Erfüllung der Aufnahmeempfehlungen der EFSA erforderlich sind, von 307/323 g (w/m) auf 247/260 g (w/m) reduzieren und somit einen relevanten Beitrag zur Calciumversorgung leisten. Ebenfalls erhöht eine Kultivierung unter natürlichem Licht im Gewächshaus die Calciumgehalte, wodurch mit 271/285 g (w/m) die geforderten Verzehrsmengen im Vergleich zu den Kontrollen in der Klimakammer ebenfalls verringert werden. Es müsste jedoch geklärt werden, ob höhere Calciumgehalte auch mit einer vermehrten Bindung als Calciumoxalatkristalle einhergeht, wodurch die Bioverfügbarkeit des Mineralstoffs für den Menschen deutlich reduziert wäre (RADEK und SAVAGE, 2008).

Eisen

Die bestimmten Eisengehalte in den Kontrollen lagen zwischen 0,12-0,14 mg g⁻¹ TM. Bezogen auf die Frischmasse entspricht dies bei einem durchschnittlichen Trockenmassegehalt von 12,81% in der Klimakammer und 13,41% im Gewächshaus Eisengehalten von 1,7-1,8 mg 100 g⁻¹ FM für die Kontrollen in der Klimakammer und 1,6 mg 100 g⁻¹ FM für die Gewächshausversuche. Damit liegen die Gehalte über bzw. im Bereich von *Brassica oleraceae* und *Brassica rapa* (0,7 bzw. 1,4 mg 100 g⁻¹ FM; HALEVY et al., 1957; VAN JAARSVELD et al., 2014) und Spinat (1,4 mg 100 g⁻¹ FM; ZHANG et al., 1985), jedoch unterhalb der Eisengehalte von *Petroselinum crispum* (5,9 mg 100 g⁻¹ FM) und *Apium graveolus* (8,7 mg 100 g⁻¹ FM) (HALEVY et al., 1957). In den Kontrollen der **Klimakammer** wurden Eisengehalte von 0,13-0,14 mg g⁻¹ TM bestimmt (Tabelle 5.50). Die Unterschiede zwischen den Versuchen gingen einher

mit leicht höheren Gehalten bei geringeren Tageslichtsummen. Die zusätzliche **LED**-Bestrahlung beeinflusste die Gehalte nicht signifikant. Eine Überdeckung mit **photoselektiven Folien** bewirkte bei der Variante PL40% eine signifikante Erhöhung des Eisengehalts (Tabelle 5.51), wodurch der negative Zusammenhang zwischen Eisengehalt und Tageslichtsumme bestätigt wird.

Tabelle 5.50: Beeinflussung des Eisengehalts [$\text{mg g}^{-1} \text{ TM}$] von *P. odorata* durch eine Zusatzbestrahlung mit LEDs: nach drei Wochen, kultiviert in der Klimakammer (Versuchsjahr 2013) unter kontrollierten Bedingungen; beschrieben werden die Gehalte in den LED-Varianten im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle

Lichtvariante*	LICHTBEDINGUNGEN		EISENGEHALT***	
	PAR-Wert [$\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$]**	Tageslichtsumme [$\text{mol m}^{-2}\text{d}^{-1}$]**	[$\text{mg g}^{-1} \text{ TM}$]	% Veränderungen gegenüber Kontrolle
FLb	81,17	4,68	0,14±0,00	
FL+B	87,96	5,07	0,15±0,00	+1,35
FLg	113,1	6,51	0,13±0,00	
FL+G	109,35	6,30	0,13±0,01	+3,85
FLr	157,31	9,06	0,13±0,01	
FL+R	149,50	8,61	0,14±0,01	+9,13

*FL+R= Ergänzung der Grundbelichtung durch rote LEDs (zugehörige Kontrolle: FLr), FL+G= Ergänzung der Grundbelichtung durch grüne LEDs (zugehörige Kontrolle: FLg), FL+B= Ergänzung der Grundbelichtung durch blaue LEDs (zugehörige Kontrolle: FLb)

**Zu Beginn des Versuchszeitraums

***Angabe sind Mittelwerte und Standardabweichungen; unterschiedliche Buchstaben bezeichnen signifikante Unterschiede zwischen LED-Variante und zugehöriger Kontrolle, fehlende Buchstaben bedeuten keine signifikanten Unterschiede (Tukey-test, $P \leq 0.05$), $n=4$

Tabelle 5.51: Beeinflussung des Eisengehalts [$\text{mg g}^{-1} \text{ TM}$] von *P. odorata* durch eine Überdeckung mit photoselektiven Folien: nach drei Wochen, kultiviert in der Klimakammer (Versuchsjahr 2013) unter kontrollierten Bedingungen; beschrieben werden die Gehalte in den Folien-Varianten im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle

Lichtvariante*	LICHTBEDINGUNGEN		EISENGEHALT***	
	PAR-Wert [$\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$]**	Tageslichtsumme [$\text{mol m}^{-2}\text{d}^{-1}$]**	[$\text{mg g}^{-1} \text{ TM}$]	% Veränderungen gegenüber Kontrolle
FLh1	113,1	6,51	0,13±0,00	
HMG72%	81,43	4,69	0,12±0,00	-4,0
FLp1	81,17	4,68	0,14±0,00	
PL57%	46,27	2,67	0,15±0,01	+1,9
FLp2	157,31	9,06	0,13 ^b ±0,01	
PL40%	62,92	3,62	0,15 ^a ±0,01	+22,1

* FL+HMG72%= Überdeckung der Pflanzen mit der Half Minus Green-Folie, erreichte Lichtintensität: 72% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLh1), FL+PL57%= Überdeckung der Pflanzen mit der Pale Lavender-Folie, erreichte Lichtintensität: 57% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLp1), FL+HMG55%= Überdeckung der Pflanzen mit der Half Minus Green-Folie, erreichte Lichtintensität: 55% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLh2), FL+PL40%= Überdeckung der Pflanzen mit der Pale Lavender-Folie, erreichte Lichtintensität: 40% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLp2),

** Zu Beginn des Versuchszeitraums

*** Angegeben sind Mittelwerte und Standardabweichungen; unterschiedliche Buchstaben bezeichnen signifikante Unterschiede zwischen Folien-Variante und zugehöriger Kontrolle, fehlende Buchstaben bedeuten keine signifikanten Unterschiede (Tukey-test, $P \leq 0.05$), $n=4$

Insgesamt zeigen die Ergebnisse aller Klimakammerversuche einen negativen Zusammenhang zwischen Eisengehalt und Tageslichtsumme (Abbildung 5.23). Eine Beeinflussung durch die spektrale Lichtzusammensetzung lässt sich nicht ableiten.

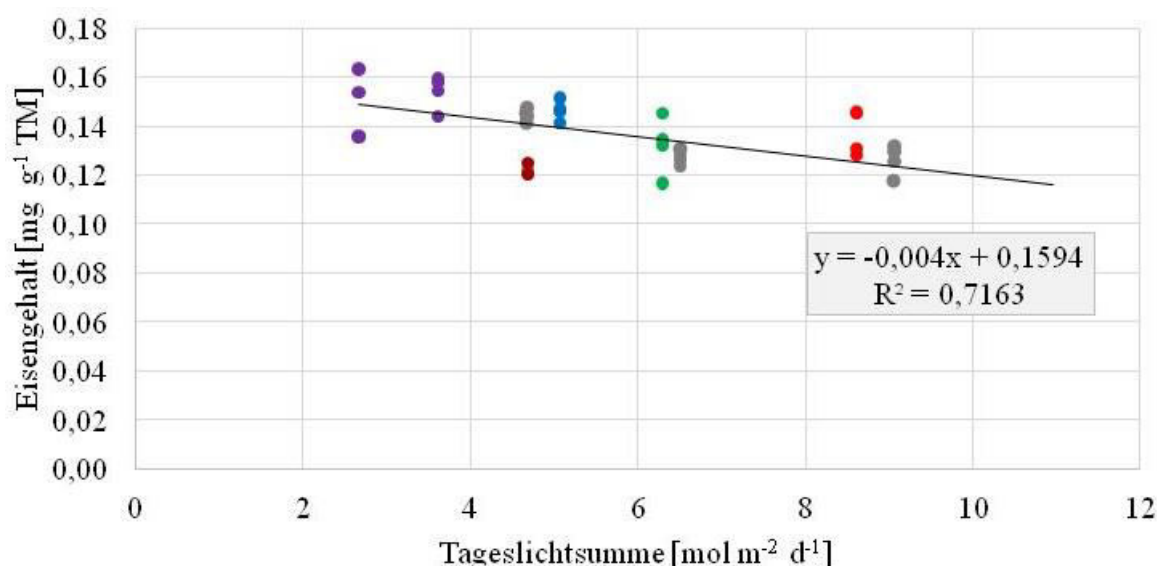


Abbildung 5.23: Zusammenhang zwischen Tageslichtsumme und dem Eisengehalt [$\text{mg g}^{-1} \text{ TM}$] von *P. odorata*, kultiviert in der Klimakammer. Dargestellt sind Einzelwerte der Varianten ($n=4$); grau: FL, blau: FL+B, grün: FL+G, rot: FL+R, lila: FL+PL, dunkelrot: FL+HMG; Regressionsgerade mit Regressionskoeffizienten (R^2) und Formel bezieht sich auf die Kontrollen (grau)

Auch die Beobachtungen bei Überdeckung der Pflanzen mit **photoselaktiven Folien** im **Gewächshaus** bestätigen den negativen Zusammenhang mit der Tageslichtsumme durch signifikant höhere Eisengehalte in den Folienvarianten (Tabelle 5.52), während die **LED**-Versuche einen positiven Zusammenhang zwischen Eisengehalt und Tageslichtsumme andeuteten. Der Eisengehalt wurde in allen LED-Varianten tendenziell erhöht mit der größten Steigerung durch rote LEDs.

Tabelle 5.52: Beeinflussung des Eisengehalts [$\text{mg g}^{-1} \text{ TM}$] von *P. odorata* durch eine Zusatzbestrahlung mit LEDs (B=Blau, G=Grün, R=Rot) bzw. eine Überdeckung mit photoselaktiven Folien (HMG= „Half minus green“-Folie; PL= „Pale Lavander“-Folie): nach drei Wochen, kultiviert im Gewächshaus (Versuchsreihe „GwH13“) mit natürlichen Licht

EISENGEHALTE*					
LED-Versuche			Folienversuche		
Lichtvariante	[$\text{mg g}^{-1} \text{ TM}$]	[%]	Lichtvariante	[$\text{mg g}^{-1} \text{ TM}$]	[%]
NL	0,12 \pm 0,01		NL	0,12 b \pm 0,01	
NL+B	0,13 \pm 0,01	+11,1	NL+HMG	0,14 a \pm 0,01	+15,3
NL+G	0,14 \pm 0,01	+12,0	NL+PL	0,15 a \pm 0,01	+19,7
NL+R	0,16 \pm 0,05	+30,8			

*Angegeben sind Mittelwerte und Standardabweichungen; kursiv geschrieben: prozentuale Veränderungen im Vergleich zur Kontrolle; unterschiedliche Buchstaben bezeichnen signifikante Unterschiede innerhalb einer Versuchsreihe zwischen Behandlungen, fehlende Buchstaben bedeuten keine signifikanten Unterschiede (Tukey-test, $P \leq 0.05$), $n=4$

Die LED-Versuche im Gewächshaus ausgenommen, ergibt sich bei einem gemittelten Korrelationskoeffizienten von $r = -0,61$ ein deutlicher, rechnerischer Zusammenhang zwischen Tageslichtsumme und Eisengehalt. Auch die spektrale Lichtzusammensetzung zeigt einen tendenziellen Einfluss, mit einem positiven Effekt des langwelligen Blaulichtanteils und einer negativen Wirkung des langwelligen Grünlichtanteils. Trotz einer mittleren Steigerung des Eisengehalts um 30% durch rote LEDs gab es in der Versuchsreihe „GwH13“ eine negative Korrelation mit dem kurzwelligen Rotlichtanteil. Die hohe durchschnittliche Steigerung beruhte jedoch auf einem Ausreißer, ohne den die Erhöhung mit 11% im Bereich der anderen LED-Varianten gelegen hätte.

Tabelle 5.53: Zusammenhang zwischen Lichteigenschaften und dem Eisengehalt in *P. odorata*, kultiviert in der Klimakammer bzw. im Gewächshaus mit Lichtmodifikationen durch zusätzliche LED-Beleuchtung oder photosensitive Folien; angegeben sind partielle Korrelationskoeffizienten nach Spearman (LED-Versuche im Gewächshaus) bzw. nach Pearson (LED-Versuche in der Klimakammer; Folien-Versuche in der Klimakammer und im Gewächshaus); die gemittelten Korrelationskoeffizienten wurden nach Fisher-Z-Transformation berechnet und zurücktransformiert

		TLS*	Korrelationskoeffizienten										
			Spektralbereichsanteile							Verhältnisse			
			401-450	451-500	501-550	551-600	601-650	651-700	B:R	BR:G	B:G	R:G	R:FR
LED	KK13	-0,49	0,36	0,20	-0,46	-0,50	0,21	-0,50	0,26	0,58	0,47	0,54	
	GwH13	0,70	0,15	0,39	0,29	-0,07	-0,43	-0,07	0,39	-0,42	-0,12	-0,52	
Folie	KK13	-0,61	0,41	0,36	0,13	-0,59	-0,50	0,34	0,69	-0,32	0,35	0,08	-0,43
	GwH13	-0,74	0,28	0,77	0,51	-0,76	0,74	-0,78	-0,38	-0,36	-0,34	0,39	0,37
Ø		-0,31	0,29	0,46	0,14	-0,51	-0,06	-0,30	0,27	-0,13	0,10	0,15	-0,04

Fett geschrieben: signifikant ($P \leq 0,05$)

*TLS= Tageslichtsumme

Die Ergebnisse deuten eine Beeinflussung des Eisengehalts sowohl durch die Tageslichtsumme als auch durch die spektrale Lichtzusammensetzung an. Der beobachtete, negative Zusammenhang mit der Tageslichtsumme stimmt mit Studien überein, in denen der Einfluss verschiedener Schattierungen auf den Eisengehalt von Kaffeeblättern untersucht wurde (CAMPANHA et al., 2004; STEIMAN et al., 2011). Diesbezüglich war der Effekt einer natürlichen Beschattung durch Bäume stärker als von Netzen, die die spektrale Lichtzusammensetzung nicht veränderten (STEIMAN et al., 2011), wodurch ein paralleler Einfluss des Lichtspektrums angedeutet wird. Als mögliche Erklärung wird die veränderte Chloroplastenzusammensetzung in schattierten Blättern genannt. Bekannt ist, dass Schattierungen zu einer Verringerung des Chl a:b-Verhältnisses (ANDERSON et al., 1973; LAISK et al., 2005; LICHTENTHALER et al., 2007, 1981), einer Vergrößerung der Grana (ANDERSON et al., 1973; YANO und TERASHIMA, 2001) mit einer höheren Anzahl an Thylakoiden (LICHTENTHALER et al., 1981), mehr Chlorophyll bezogen auf die Trockenmasse (ANDERSON et al., 1973; LICHTENTHALER et al., 1981) und Gehaltssteigerungen von Verbindungen, die an der Elektronentransportkette beteiligt sind (LAISK et al., 2005), führen. Das meiste Eisen in den Blättern befindet sich mit 73-79% (TERRY und LOW, 1982) bzw. 80-90% (SOLTI et al., 2012) in den Chloroplasten, weswegen ein Zusammenhang zwischen Eisengehalt und schattierungsbedingten Veränderungen der Chloroplastenzusammensetzung möglich erscheint. In *P. odorata* kann bei einem signifikant höheren Eisengehalt eine Verringerung, teilweise signifikant, des Chl a:b-Verhältnisses beobachtet werden (siehe Anhang 2), ein weiterer Hinweis auf eine Adaption an die geringeren Tageslichtsummen, die bei diesen Varianten vorlagen. Eine Erhöhung des Eisengehalts als Adaption an Schattenbedingungen könnte möglicherweise auch die tendenzielle Erhöhung des Eisengehalts durch rote LEDs bei beiden Standorten erklären, da Chloroplasten bei roter Beleuchtung ähnliche Charakteristika aufweisen im Hinblick auf ihre Thylakoidzusammensetzung, photosynthetische Aktivität und Chloroplastenstruktur wie unter Schattenbedingungen (BUSCHMANN et al., 1978). Möglicherweise kann jedoch auch eine phytochromevermittelte Verringerung der Konzentration an Abscisinsäure (TOYOMASU et al., 1994; WEATHERWAX et al., 1996) als Mediator der Transpiration (CHEN et al., 2001;

KANG et al., 2005a; SCHRAVENDIJK und VAN ANDEL, 1985) den positiven Effekt roter LEDs auf den Eisengehalt erklären.

Gegebenenfalls können jedoch auch unterschiedliche Geschwindigkeiten der Biomasseakkumulation und Mineralstoffaufnahme zu den geringeren Eisenkonzentrationen geführt haben. Der Verdünnungseffekt wurde für Eisen bereits beschrieben (BELKHODJA et al., 1998). In der vorliegenden Arbeit wird dieser durch eine negative Korrelation zwischen Eisengehalt und Trockenmasse angedeutet (Tabelle 5.29). Von MCGRATH (1985) wird die wachstumsbedingte Verdünnung der Eisenkonzentration auf geringere Diffusionskoeffizienten zurückgeführt, wodurch sich die Eisenionen nur langsam zu den Pflanzenwurzeln bewegen und möglicherweise den erhöhten Bedarf der schnell wachsenden Pflanzen nicht erfüllen können. Vor allem bei Eisen wurden Mechanismen der Pflanzen identifiziert, die eine Aufnahme des Mineralstoffes unterstützen (siehe Abschnitt 2.3.3.1). Denkbar ist deswegen, dass, obgleich auch die Transpirationsströme durch das Pflanzenwachstum ansteigen sollten, die Löslichkeit und Verfügbarkeit der Eisenionen deren Aufnahme limitieren und die Pflanzen ihre Mechanismen nicht an die Geschwindigkeit des Mineralstoffbedarfs anpassen konnten.

Die Beeinflussung des Eisengehalts durch die spektrale Lichtzusammensetzung wurde bislang nur selten beschrieben. Eine unterschiedliche Beeinflussung des Eisengehalts in den Kaffeeblättern durch Baumschatten und Netze könnte auf einen Einfluss des Lichtspektrums hindeuten (STEIMAN et al., 2011). Da jedoch Angaben der Veränderung der Bestrahlungsstärke durch die Bäume fehlen, können auch unterschiedliche Schattierungslevel zu den Unterschieden geführt haben. Studien mit Brokkolisprossen und *Tagetes patula* (KOPSELL et al., 2014; KOPSELL und SAMS, 2013; SAMS et al., 2016) deuten jedoch einen Einfluss der spektralen Lichtzusammensetzung an. Positive Effekte wurden insbesondere durch eine Bestrahlung mit blauen LEDs erreicht, deren Emissionsspektrum mit 447 ± 5 nm bzw. 470 nm vor allem den mittel- und langwelligen Blaulichtanteil erhöhte. Diese Studien würden daher die vorliegenden Ergebnisse mit den berechneten Korrelationen des Eisengehalts und dem langwelligen Blaulichtanteil bestätigen. Auch im Hinblick auf das Blaulicht wurden Veränderungen der Blattstruktur, insbesondere die Dicke des Palisadenparenchyms und die Chloroplastenanzahl, beobachtet (COSTA et al., 2010; RICHTER und WESSEL, 1985; SCHUERGER et al., 1997). Inwieweit die Chloroplastenentwicklung die positiven Korrelationen mit dem langwelligen Blaulichtanteil und die tendenziellen Erhöhungen durch die zusätzlichen blauen LEDs erklären können, ist jedoch unklar. Diesbezüglich sind viele weitere Untersuchungen erforderlich.

Die vorliegenden Ergebnisse deuten einen negativen Zusammenhang zwischen Eisengehalt und Tageslichtsumme an. Während eine Beeinflussung durch unterschiedliche Geschwindigkeiten der Biomasseakkumulation und Mineralstoffaufnahme als entscheidender Faktor für die Korrelation mit der Tageslichtsumme nicht ausgeschlossen ist, deuten die Korrelationskoeffizienten für die spektrale Lichtzusammensetzung an, dass die Beobachtungen nicht allein auf dem Verdünnungseffekt beruhen. Andernfalls wären negative Korrelationen mit den Spektralbereichen erwartet worden, die bevorzugt durch Photosynthesepigmente absorbiert werden und dadurch die Biomasseakkumulation fördern. Im Gegensatz

dazu führten Erhöhungen des blauen und roten Spektralbereichs mitunter zu höheren Eisengehalten. Steigerungen der Eisengehalte wären aufgrund des weltweit verbreiteten Eisenmangels von großem Interesse. Die Gehalte waren in Klimakammer und Gewächshaus ähnlich und bedeuten eine Verzehrsmenge von ca. 550 g *P. odorata* um die Aufnahmeempfehlungen der EFSA zu erreichen. Durch Modifizierungen der Lichtbedingungen waren jedoch deutliche Steigerungen des Eisengehalts in den Pflanzen möglich, mit entsprechenden Reduktionen der erforderlichen Verzehrsmenge um 22 (PL40% in der Klimakammer) bzw. 31% (NL+R im Gewächshaus).

5.2 Beeinflussung der Wachstumsparameter durch das Licht

Das Pflanzenwachstum und die Biomassebildung sind aus wirtschaftlicher Sicht von großem Interesse, können jedoch aufgrund von Verdünnungs- bzw. Synergieeffekten auch die Akkumulation von Inhaltsstoffen beeinflussen (siehe Abschnitt 5.1.7). Licht als dominierender Einflussfaktor der Pflanzenentwicklung wurde bereits in zahlreichen Studien untersucht und beschrieben (siehe Abschnitt 2.2.3).

5.2.1 Triebwachstum

Das Pflanzenwachstum von *P. odorata* wurde anhand der Länge der Haupttriebe charakterisiert. Die Pflanzenhöhe als Wachstumsparameter war aufgrund des buschigen Wachstums der Pflanzen ungeeignet (Abbildung 5.24). Die Länge der Haupttriebe wurde wöchentlich gemessen, die statistische Auswertung bezieht sich auf das Gesamtwachstum nach drei Wochen Versuchslaufzeit.

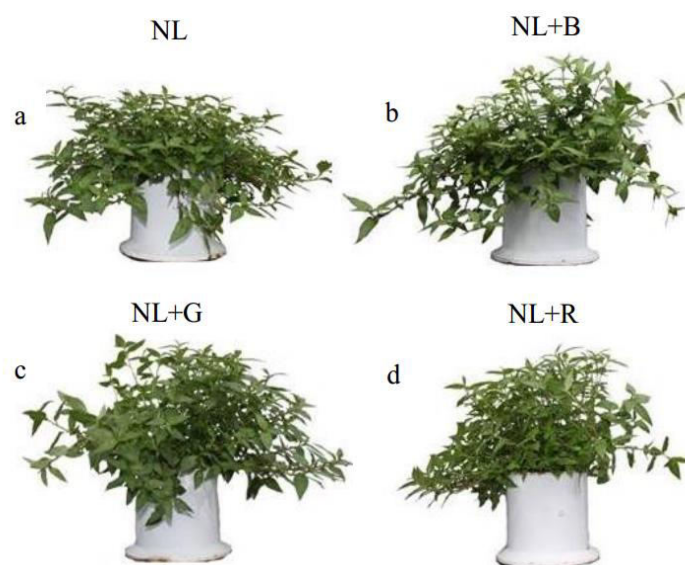


Abbildung 5.24 a-d: Beeinflussung des Wachstums von *P. odorata* durch zusätzliche Bestrahlungen mit LEDs im Gewächshaus (Versuchsreihe „GwH13“)

Am Ende der Versuchslaufzeit wurden bei den Kontrollen in der **Klimakammer** durchschnittliche Trieb-längen von 26,45-38,24 cm gemessen. Im Gewächshaus war die Spannweite mit 28,08-36,91 cm ver-

gleichbar. Die durchschnittlichen Trieb­längen der Kontrollen in der Klimakammer zeigten einen negativen Zusammenhang mit der Tageslichtsumme (Abbildung 5.25). Eine zusätzliche Bestrahlung mit **LEDs** bewirkte signifikant längere Haupttriebe bei einer Bestrahlung mit blauen LEDs. Der Einsatz grüner und roter LEDs hatte hingegen keinen Effekt.

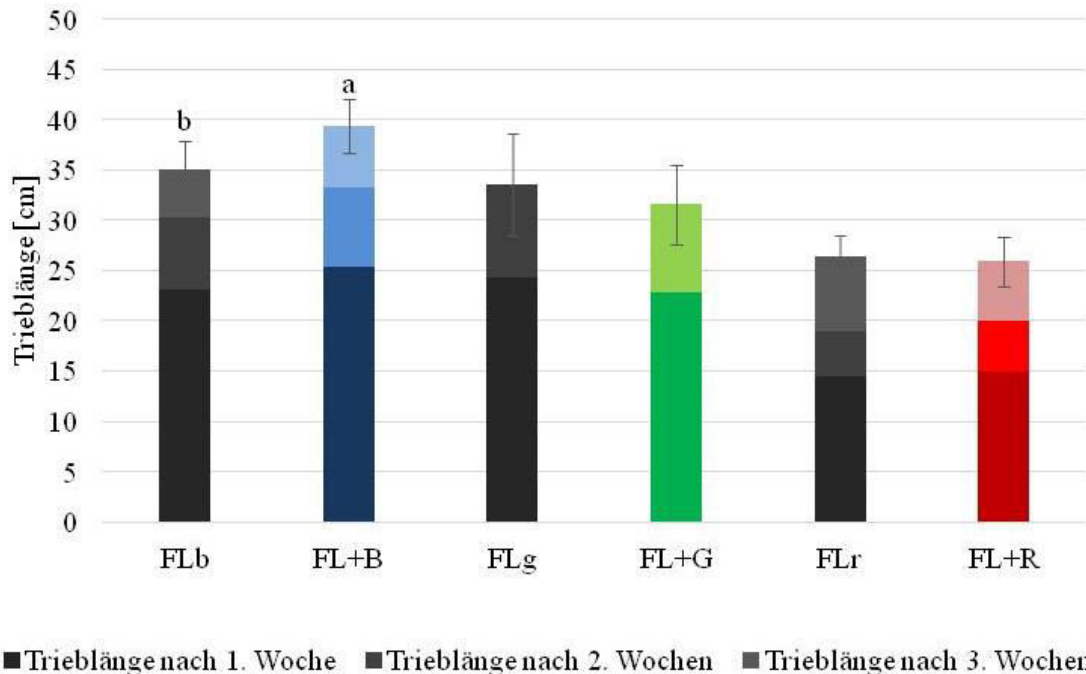


Abbildung 5.25: Beeinflussung des Wachstums von *P. odorata* durch zusätzliche Bestrahlungen mit LEDs, kultiviert in der Klimakammer mit Leuchtstoffröhren; FL+R= Ergänzung der Grundbelichtung durch rote LEDs (zugehörige Kontrolle: FLr), FL+G= Ergänzung der Grundbelichtung durch grüne LEDs (zugehörige Kontrolle: FLg), FL+B= Ergänzung der Grundbelichtung durch blaue LEDs (zugehörige Kontrolle: FLb); dargestellt ist das wöchentliche Längenwachstum; unterschiedliche Buchstaben bezeichnen signifikante Unterschiede der Trieb­längen nach drei Wochen zwischen LED-Variante und zugehöriger Kontrolle (Tukey-test, $P \leq 0.05$), $n=16$ (FL+B), $n=20$ (FL+G, FL+R)

Auch die Kontrollen im **Gewächshaus** zeigen einen Zusammenhang zwischen den Längen der Haupttriebe und den Tageslichtsummen während des gesamten Versuchszeitraums ($R^2=0,44$, Abbildung 5.26). Durch Einbeziehung der mittleren Tages- und Nachttemperaturen können die Varianzen zwischen den Versuchsreihen weitgehend erklärt werden ($R^2=0,96$, siehe Anhang Tabelle 12.25). Insbesondere hohe Tagestemperaturen scheinen in einem positiven Zusammenhang mit längeren Haupttrieben zu stehen. So gab es während der Versuchsreihe „GwH13“ die höchsten Temperaturen, zugleich waren die Triebe der Kontrollen am längsten (Abbildung 4.13). Der Einfluss der Temperatur auf das Längenwachstum wurde bereits für mehrere Pflanzen beschrieben, zurückgeführt auf höhere Aktivitäten der PIFs bei steigenden Temperaturen (FRANKLIN et al., 2011; JOHANSSON et al., 2014; SUN et al., 2012a), resultierend in einer steigenden Synthese von Auxin (DELKER et al., 2014; FRANKLIN et al., 2011; SUN et al., 2012a). Eine Berechnung multipler Korrelationen unter Einbeziehung der Luftfeuchtigkeit (Tag bzw. Nacht, Tabelle 4.7) war nicht möglich, da die Statistiksoftware lineare Zusammenhänge mit der Tages- und Nachttemperatur erkannte. Da dadurch keine Unabhängigkeit der Variablen vorliegt, wurden Tages- und Nachtluftfeuchten von dem Programm nicht berücksichtigt. Multiple Korrelation mit beiden Luftfeuchten ($R^2= 0,43$, siehe Anhang Tabelle 12.25) deuten einen Einfluss an, jedoch

kann dieser auch auf der Abhängigkeit der Luftfeuchtigkeiten von den Temperaturen beruhen. Da das Bestimmtheitsmaß für Tages- und Nachttemperatur ($R^2=0,62$) jedoch höher lag, werden die Varianzen zwischen den Versuchsreihen besser durch die Temperaturen erklärt. Eine Beeinflussung des Triebwachstums durch die Luftfeuchtigkeit ist jedoch nicht ausgeschlossen und wurde für andere Pflanzen beschrieben mit einem leicht positiven Effekt steigender Luftfeuchtigkeiten auf das Wachstum (MORTENSEN, 1986; MORTENSEN und FJELD, 1998; MORTENSEN und GISLERØD, 2000).

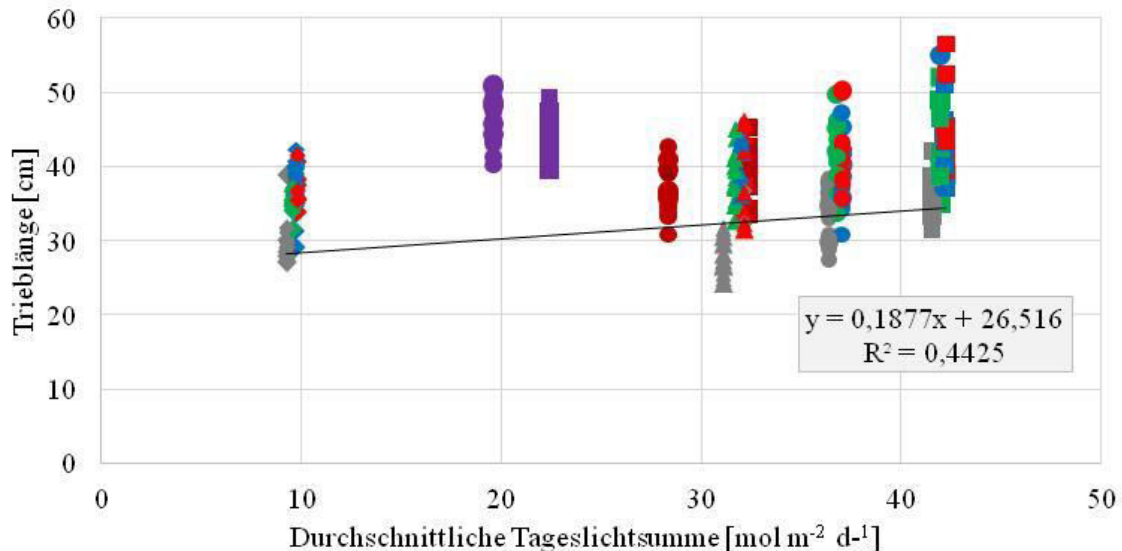


Abbildung 5.26: Zusammenhang zwischen durchschnittlicher Tageslichtsumme und Trieblänge [cm] der Kontrollen im Gewächshaus; Quadrate: „GwH13“, Kreise: „GwH14“, Rauten: „GwH14, nachts“, Dreiecke: „GwH14, 24h“; Regressionsgerade mit Regressionskoeffizienten (R^2) und Formel bezieht sich auf die Kontrollen (grau)

Durch den Einsatz von **LEDs** wurde das mittlere Triebwachstum in allen Versuchsreihen signifikant gegenüber der Kontrolle gesteigert (Abbildung 5.27). Teilweise können die triebblängenfördernden Wirkungen der LEDs mit einer simultan stattgefundenen Erhöhung der Biomassebildung erklärt werden. Für die Versuchsreihe „GwH14“ wurde eine signifikant positive Korrelation für den Zusammenhang zwischen Trieblänge und Frischmasse berechnet ($r=0,53$), für die Versuchsreihe „GwH14, 24h“ für die Zusammenhänge zwischen Trieblänge und Frischmasse ($r=0,68$) bzw. Blattmasse ($r=0,53$). Auffällig waren hingegen in der Versuchsreihe „GwH13“ die signifikant längeren Haupttriebe der Variante NL+R im Vergleich zur Kontrolle und der Variante NL+B, da die Frischmasse der Variante NL+R zugleich signifikant geringer war als bei NL+B und zumindest tendenziell geringer als bei der Kontrolle (Tabelle 5.57). Entsprechend lag für diese Versuchsreihe kein signifikanter Zusammenhang zwischen Trieblänge und Frischmasse vor ($r=0,16$). Möglicherweise kann die Wirkung roter LEDs auf Wechselwirkungen mit den Temperaturen zurückgeführt werden. Während Cry1 auch bei hohen Temperaturen mit PIF4 interagieren kann, resultierend in einer verringerten Auxin-Biosynthese und einem reduzierten Wachstum (MA et al., 2016), können die längeren Triebe bei einer Supplementierung mit kurzwelligen Rotlicht damit erklärt werden, dass Phytochrome durch steigende Temperaturen inaktiviert werden (JUNG et al., 2016; LEGRIS et al., 2016) und somit möglicherweise nicht mehr zur Inaktivierung der PIFs beitragen konnten. Unklar ist jedoch der signifikante Unterschied zur Kontrolle.

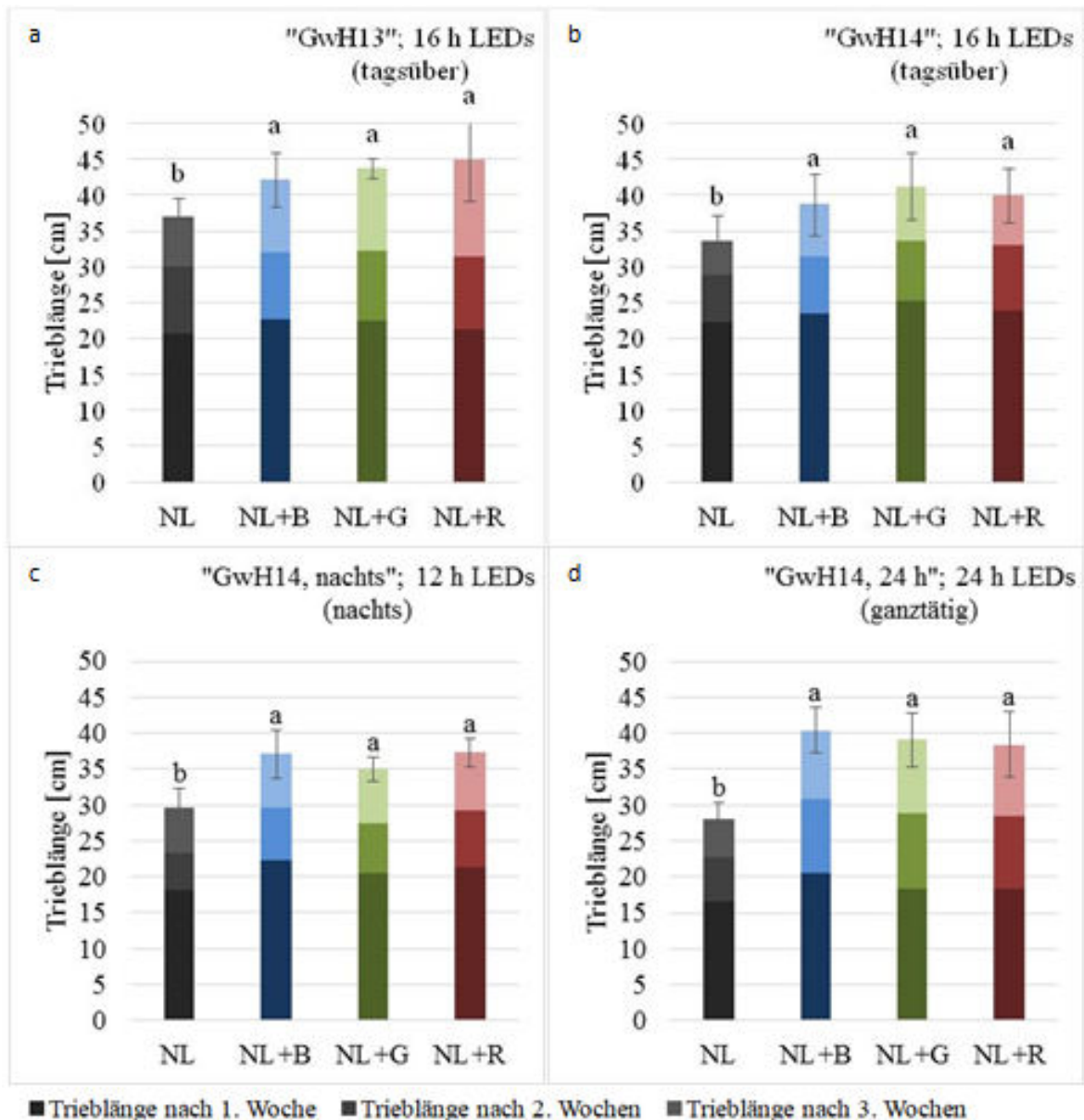


Abbildung 5.27 a-d: Beeinflussung des TriebLängenwachstums von *P. odorata* durch zusätzliche Bestrahlungen mit LEDs (B=Blau, G=Grün, R=Rot), kultiviert im Gewächshaus mit natürlichem Licht; dargestellt ist das wöchentliche Längenwachstum; unterschiedliche Buchstaben bezeichnen signifikante Unterschiede zwischen Behandlungen (Tukey-test, $P \leq 0.05$), $n=12$ („GwH13“), $n=18$ („GwH14“, „GwH14, nachts“, „GwH14, 24 h“)

Wie auch bei den Versuchen mit zusätzlichen LEDs (Abbildung 5.24) deutet auch der optische Vergleich der Pflanzen, gewachsen in der *Klimakammer* unter *photoselktiven Folien*, keine Beeinflussung durch die Lichtmodifizierung an (Abbildung 5.28).



Abbildung 5.28: Beeinflussung des Wachstum von *P. odorata* (Versuchsreihe „KK13“) durch Überdeckung mit photoselktiven Folien; abgebildet sind Pflanzen, gewachsen unter photoselktiven Folien („PL40%“= Überdeckung der Pflanzen mit der Pale Lavander-Folie, erreichte Lichtintensität: 40% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLp2) bzw. „HMG72%“= Überdeckung der Pflanzen mit der Half Minus Green-Folie, erreichte Lichtintensität: 72% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLh1)) und zum Vergleich Pflanzen der zugehörigen Kontrollbedingungen

Dies bestätigen auch die Messungen des Triblängenwachstums (Abbildung 5.29). Signifikante Unterschiede zwischen Folienvariante und zugehöriger Kontrolle konnten nicht berechnet werden. Eine tendenzielle Erhöhung der Triblängen wurde nur bei der Variante „HMG55%“ festgestellt. Eine unterschiedliche Beeinflussung des Triebwachstums durch die Varianten „HMG55%“ und „PL57%“ deutet eine Beeinflussung durch die spektrale Lichtzusammensetzung an.

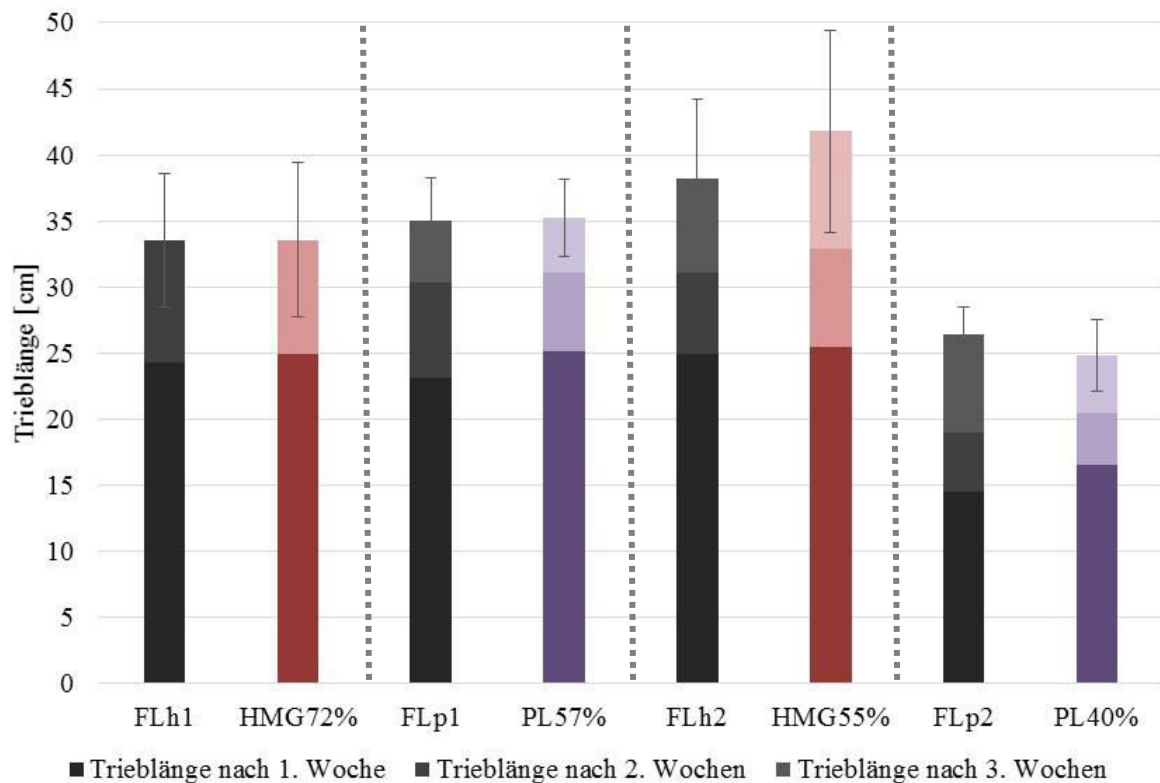


Abbildung 5.29: Beeinflussung des Triebwachstums von *P. odorata* im in der Klimakammer durch Überdeckung mit photoselktiven Folien (FL+HMG72%= Überdeckung der Pflanzen mit der Half Minus Green-Folie, erreichte Lichtintensität: 72% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLh1), FL+PL57%= Überdeckung der Pflanzen mit der Pale Lavander-Folie, erreichte Lichtintensität: 57% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLp1), FL+HMG55%= Überdeckung der Pflanzen mit der Half Minus Green-Folie, erreichte Lichtintensität: 55% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLh2), FL+PL40%= Überdeckung der Pflanzen mit der Pale Lavander-Folie, erreichte Lichtintensität: 40% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLp2)): kultiviert im Klimaschrank mit Leuchtstoffröhren; dargestellt ist das wöchentliche Längenwachstum; unterschiedliche Buchstaben bezeichnen signifikante Unterschiede der Triebblänge nach drei Wochen zwischen Folien-Variante und zugehöriger Kontrolle (Tukey-test, $P \leq 0.05$), $n=16$ (FL+PL57%), $n=20$ (FL+HMG72%, FL+HMG55%, FL+PL40%).

Anders als in der Klimakammer deutet der optische Vergleich der **Gewächshauspflanzen**, gewachsen unter einer **photoselktiven Folie**, bereits auf Unterschiede im Wachstum hin (Abbildung 5.30a-c). Die Kontrollen wuchsen buschiger, während die Pflanzen unter den Folien, besonders unter der „Pale Lavander“-Folie, sich mehr in die Höhe streckten.



Abbildung 5.30 a-c: Beeinflussung des Wachstums von *P. odorata* durch Überdeckung mit photoselktiven Folien im Gewächshaus: NL= Natürliches Licht (=Kontrolle), NL-HMG= Überdeckung mit Half Minus Green-Folie, NL-PL= Überdeckung mit Pale Lavander-Folie (Versuchsreihe „GwH13“)

Dies äußerte sich in beiden Versuchsreihen in signifikant längeren Haupttriebe der Pflanzen unter der „PL“-Folie im Vergleich zur Kontrolle und HMG-Variante (Abbildung 5.31).

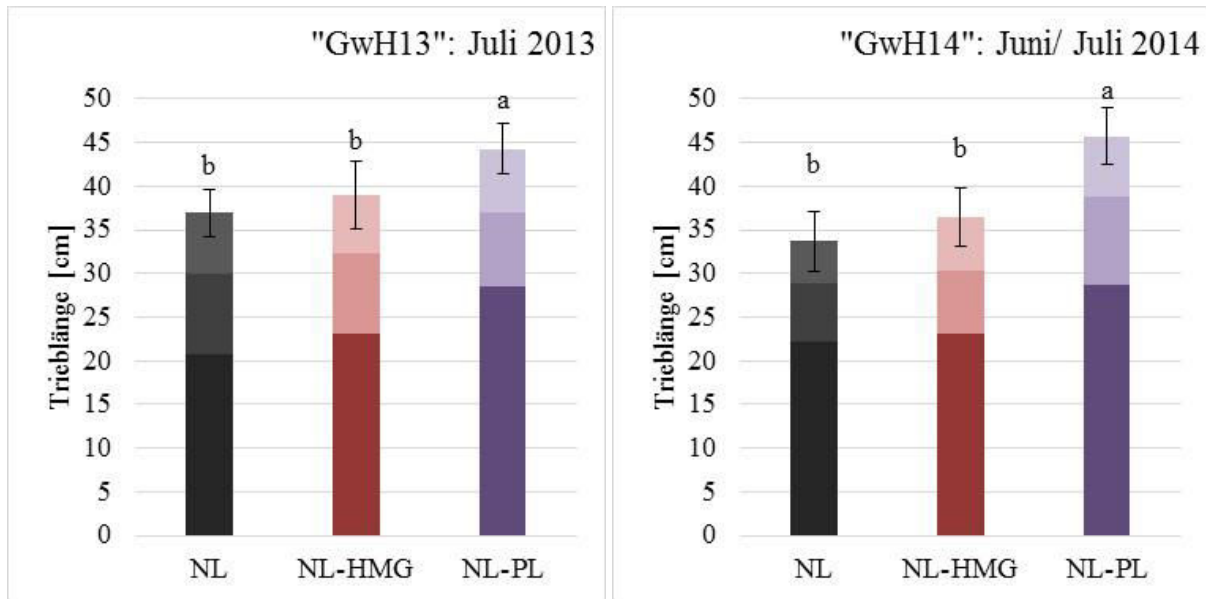


Abbildung 5.31 a, b: Beeinflussung der Trieblänge von *P. odorata* durch Überdeckung mit photoselaktiven Folien (NL= Natürliches Licht (=Kontrolle), NL-HMG= Überdeckung mit Half Minus Green-Folie, NL-PL= Überdeckung mit Pale Lavender-Folie): kultiviert im Gewächshaus mit natürlichem Licht; dargestellt ist das wöchentliche Längenwachstum; unterschiedliche Buchstaben bezeichnen signifikante Unterschiede zwischen Behandlungen (Tukey-test, $P \leq 0.05$), $n=12$ („GwH13“), $n=18$ („GwH14“)

Die Ergebnisse der Klimakammerversuche sind in der Abbildung 5.32 zusammengefasst, die keine Zusammenhänge zwischen der Trieblänge und den Lichteigenschaften erkennen lässt.

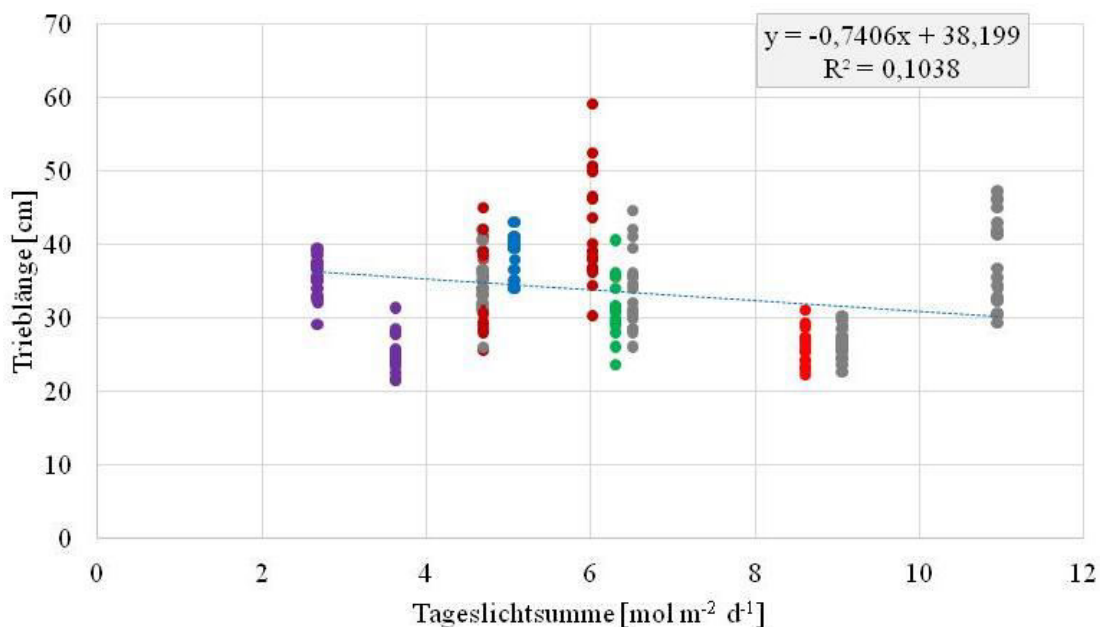


Abbildung 5.32: Zusammenhang zwischen Tageslichtsumme und dem Triebwachstum in der Klimakammer; Unterschiede der Lichtzusammensetzung nicht berücksichtigt. grau: FL, blau: FL+B, grün: FL+G, rot: FL+R, lila: FL+PL, dunkelrot: FL+HMG; Regressionsgerade mit Regressionskoeffizienten (R^2) und Formel bezieht sich auf die Kontrollen (grau)

Die Korrelationskoeffizienten zeigten für die einzelnen Versuchsreihen viele signifikante Zusammenhänge mit den Lichteigenschaften (Tabelle 5.54). Da in einigen Versuchsreihen der Korrelationskoeffizient für die Tageslichtsumme positiv, in anderen negativ war, kann durch den gemittelten Korrelationskoeffizienten kein tendenzieller Einfluss abgeleitet werden. Ähnlich ist dies im Hinblick auf die spektrale Lichtzusammensetzung. Versuchsreihenübergreifend kann lediglich ein negativer Zusammenhang mit dem R:G-Verhältnis beschrieben werden.

Tabelle 5.54: Zusammenhang zwischen Lichteigenschaften und dem Triebwachstum von *P. odorata*, kultiviert in der Klimakammer bzw. im Gewächshaus mit Lichtmodifikationen durch zusätzliche LED-Beleuchtung oder photosensitive Folien; angegeben sind partielle Korrelationskoeffizienten nach Spearman (LED-Versuche im Gewächshaus) bzw. nach Pearson (LED-Versuche in der Klimakammer; Folien-Versuche in der Klimakammer und im Gewächshaus)

		Korrelationskoeffizienten											
		PAR- Wert	Spektralbereichsanteile						Verhältnisse				
			401- 450	451- 500	501- 550	551- 600	601- 650	651- 700	B:R	BR:G	B:G	R:G	R:FR
LED	KK13	-0,73	0,51	0,51	-0,28	-0,35	-0,37	-0,35	0,52	0,35	0,46	-0,01	
	GwH13	0,52	-0,09	0,15	0,30	-0,05	-0,17	-0,02	0,16	-0,41	-0,27	-0,36	
	GwH14	0,39	-0,16	0,13	0,30	-0,10	-0,19	-0,08	0,14	-0,48	-0,35	-0,43	
	GwH14, nachts	0,60	0,03	0,15	-0,13	-0,46	-0,39	-0,45	0,17	-0,21	-0,03	-0,40	
	GwH14, 24h	0,47	0,03	0,33	0,12	-0,42	-0,55	-0,40	0,35	-0,50	-0,20	-0,65	
Folie	KK13	0,10	-0,26	-0,20	-0,09	0,31	0,25	-0,22	-0,37	0,18	-0,21	-0,04	0,25
	GwH13	-0,69	0,22	0,22	0,22	-0,23	-0,22	0,22	0,22	0,24	0,22	-0,20	-0,21
	GwH14	-0,81	0,41	0,41	0,40	-0,41	-0,40	0,41	0,40	0,40	0,40	-0,41	-0,43
	Ø	-0,08	0,09	0,22	0,11	-0,22	-0,26	-0,12	0,21	-0,06	0,01	-0,33	-0,14

Fett geschrieben: signifikant ($P \leq 0,05$)

Aus der Tabelle 5.54 können anstatt einer allgemeinen Aussage im Hinblick auf die Beeinflussung der Trieblänge durch die Lichtbedingungen zwei unterschiedliche Tendenzen abgeleitet werden. In den Versuchsreihen „GwH13“ (LEDs), „GwH14“ (LEDs), „GwH14, nachts“ und „GwH14, 24h“ zeigt sich ein positiver Zusammenhang zwischen Triebwachstum und der Tageslichtsumme, einhergehend mit höheren Frischmassen. Zugleich zeigte sich im Vergleich dieser Versuchsreihen ein positiver Effekt steigender Temperaturen auf die Trieblänge. In diesen Versuchsreihen gibt es zudem übereinstimmend negative Korrelationen mit den BR:G- und R:G-Verhältnissen, sowie dem kurzwelligen Rotlichtanteil. Als zweite Tendenz sind in den Versuchsreihen „KK13“ (LEDs), „GwH13“ (Folien) und „GwH14“ (Folien) steigende Triebängen bei sinkenden Tageslichtsummen erkennbar. In diesen Versuchsreihen liegen zudem positive Korrelationen mit den Blaulichtanteilen, den B:R-, BR:G- und B:G-Verhältnissen vor.

Die Beobachtungen deuten auf situationsabhängige, unterschiedliche Reaktionen der Pflanzen auf die Lichtbedingungen hin. Positive Korrelationen sowohl zwischen Trieblänge und Tageslichtsumme, als auch zwischen Trieblänge und Frischmasse weisen auf eine allgemeine Förderung des Pflanzenwachstums durch eine stärkere Verfügbarkeit der Ressource Lichtenergie hin. Dabei wird durch die Korrelationskoeffizienten angedeutet, dass die blauen und roten Spektralbereiche unabhängig von der Tageslichtsumme das Triebwachstum hemmen. So bewirkten blaue LEDs in der Versuchsreihe „GwH14“ zwar eine Steigerung der Trieblänge um durchschnittlich 15%, zugleich wurde die Frischmasse jedoch

um 30% erhöht. Durch rote LEDs wurden die Triebhöhen um durchschnittlich 19% verlängert, die Frischmasse um 28% gesteigert. Ähnlich verhielt sich dies in den anderen Versuchsreihen. Das Triebhöhenwachstum war folglich vergleichsweise gering. Dadurch bestätigten die vorliegenden Ergebnisse die Erkenntnisse anderer Studien, in denen sowohl hohe Rotlichtanteile (CUMMINGS, 2011), als auch hohe Blaulichtanteile (COPE ET AL., 2014) mit vergleichsweise geringen Pflanzenhöhen assoziiert werden und zugleich die Biomassebildung fördern (HERNÁNDEZ und KUBOTA, 2016; HOGEWONING et al., 2010b; NOVICKOVAS et al., 2012; SAMUOLIENE et al., 2012a; STUEFER und HUBER, 1998; XIAOYING et al., 2011).

Steigende Triebhöhen bei sinkenden Tageslichtsummen können hingegen als Teil des Schattenvermeidungssyndroms angesehen werden (KEUSKAMP et al., 2012; TARAKANOV, 2006) und wurden auch in anderen Pflanzen beobachtet (FAN et al., 2013; FUKUDA et al., 2002). Die Streckung der Pflanzen konnte bei den Folienversuchen im Gewächshaus auch optisch gesehen werden (Abbildung 5.30). Interessanterweise wurde der negative Zusammenhang zwischen Triebhöhe und Tageslichtsumme nur in der Klimakammer und den Folienversuchen im Gewächshaus beobachtet. Unerwartet sind die positiven Korrelationen mit den Blaulichtanteilen und assoziierten Verhältnissen, da eine Reduktion des Blaulichtanteils als ein Indikator für Schattenbedingungen mit einem gesteigerten Triebwachstum in Verbindung gebracht wird (KEUSKAMP et al., 2012). Jedoch geht die Erhöhung der Triebhöhe (+12%) durch die Verwendung blauer LEDs einher mit einer Erhöhung der Frischmasse (+27%), wodurch bei dieser Variante möglicherweise die verlängerten Triebe auf ein allgemein gesteigertes Pflanzenwachstum durch blaues Licht zurückgeführt werden können und nicht als alleinige Reaktion auf einen erhöhten Blaulichtanteil zu deuten sind.

Insgesamt bestätigen die vorliegenden Ergebnisse andere Studien, in denen die Pflanzenmorphologie durch eine Interaktion zwischen Lichtquantität und -qualität beeinflusst wurde (COPE und BUGBEE, 2013). Es kann zwischen zwei Reaktionen differenziert werden: einer Steigerung der Triebhöhen bei steigenden Tageslichtsummen, einhergehend mit einem allgemein gesteigerten Pflanzenwachstum, und eine Steigerung der Triebhöhen bei sinkenden Tageslichtsummen. Durch bestimmte Spektralbereiche wurden die Reaktionen verstärkt.

5.2.2 Biomasseakkumulierung

Es gibt viele Kennzahlen, die die Biomasseakkumulierung beschreiben. In der vorliegenden Arbeit wurde die Frischmasse als Gesamtheit aller oberirdischen Pflanzenteile bestimmt. Die verzehrbaren Anteile wurden in der Blattmasse zusammengefasst. Das Blatt:Frischmasse-Verhältnis beschreibt die Verteilung der Frischmasse auf Blätter und Stängel. Weiter wurde der Trockenmassegehalt [%] der Blattmasse bestimmt, der Rückschlüsse auf den Wassergehalt der Pflanzen erlaubt. Durch Trockenmassegehalt und Blattmasse wurde die Trockenmasse der Pflanzen berechnet.

Die Biomassen (Frisch-, Blatt- und Trockenmasse) korrelierten erwartungsgemäß signifikant untereinander (siehe Anhang 5, Tabelle 12.16- Tabelle 12.23), wodurch sich eine Separierung der Parameter nicht als sinnvoll erwies. Aufgrund der theoretischen und rechnerischen Zusammenhänge bot es sich deswegen an, alle Parameter der Biomassebildung in einem Abschnitt zusammenzufassen.

5.2.2.1 Biomasseakkumulierung in der Klimakammer

Die Frischmassen in der **Klimakammer** lagen zwischen 32,04-60,78 g/ Pflanze, die entsprechenden Blattmassen bei 21,29-43,15 g/ Pflanze in den Kontrollen (Tabelle 5.55, Tabelle 5.56). Die resultierenden Blatt:Frischmasse-Verhältnisse waren mit 0,67-0,75 vergleichsweise höher als im Gewächshaus. Die Kontrollen hatten Trockenmassen von 2,78-5,36 g/ Pflanze und Trockenmassegehalte von 11,65-13,57%. Während Frisch-, Blatt- und Trockenmassen in den Kontrollen eine Abhängigkeit von der Tageslichtsumme andeuten, kann dieser Zusammenhang für das Blatt:Frischmasse-Verhältnis und den Trockenmassegehalt nicht beobachtet werden. Bestrahlungen mit zusätzlichen **LEDs** hatten unterschiedliche Wirkungen. Blaue LEDs führten zu einer signifikanten Steigerung von Frisch- Blatt- und Trockenmassen sowie dem Trockenmassegehalt. Grüne LEDs bewirkten tendenzielle Steigerungen der Frisch- und Blattmassen und erhöhten Trockenmasse und Trockenmassegehalt signifikant im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle. Rote LEDs beeinflussten die Frischmasse nicht, führten aber zu einer signifikant verringerten Blattmasse und Blatt:Frischmasse-Verhältnis. Der Trockenmassegehalt wurde signifikant erhöht, die Trockenmasse hingegen nur tendenziell gesteigert.

Tabelle 5.55: Beeinflussung der Biomasseakkumulierung von *P. odorata* durch zusätzliche LED-Beleuchtung (B=Blau, G=Grün, R=Rot): nach drei Wochen, kultiviert in der Klimakammer (Versuchsjahr 2013) unter kontrollierten Bedingungen (FM= Frischmasse; BM= Blattmasse; BM:FM= Blatt:Frischmasse-Verhältnis; TM= Trockenmasse; TM%= Trockenmassegehalt); beschrieben werden die Gehalte in den LED-Varianten (FL+B, FL+G, FL+R) im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle

Variante*	LICHTBEDINGUNGEN**		WACHSTUMSPARAMETER***				
	PAR-Wert [$\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$]	Tageslicht- summe [$\text{mol m}^{-2}\text{d}^{-1}$]	FM [g/ Pflanze]	BM [g/ Pflanze]	BM:FM	TM [g/ Pflanze]	TM% [%]
FLb	81,17	4,68	32,04 ^b ±1,64	21,29 ^b ±0,41	0,67±0,04	2,78 ^b ±0,10	13,05±0,42
FL+B	87,96	5,07	40,76 ^a ±2,49	28,83 ^a ±1,70	0,71±0,01	3,86 ^a ±0,35	13,41±1,28
FLg	113,1	6,51	43,40±4,20	32,57±3,98	0,75±0,02	4,16±0,52	12,76 ^b ±0,17
FL+G	109,35	6,30	47,73±5,76	34,51±5,41	0,72±0,05	4,87±0,82	14,14 ^a ±0,24
FLr	157,31	9,06	60,78±3,21	43,15 ^a ±2,17	0,71 ^a ±0,01	5,03±0,52	11,65 ^b ±0,98
FL+R	149,50	8,61	59,37±9,96	37,80 ^b ±6,76	0,64 ^b ±0,04	5,28±0,92	14,05 ^a ±1,35

*FL+R= Ergänzung der Grundbelichtung durch rote LEDs (zugehörige Kontrolle: FLr), FL+G= Ergänzung der Grundbelichtung durch grüne LEDs (zugehörige Kontrolle: FLg), FL+B= Ergänzung der Grundbelichtung durch blaue LEDs (zugehörige Kontrolle: FLb)

**Zu Beginn des Versuchszeitraums

***Angabe sind Mittelwerte und Standardabweichungen; unterschiedliche Buchstaben bezeichnen signifikante Unterschiede zwischen LED-Variante und zugehöriger Kontrolle, fehlende Buchstaben bedeuten keine signifikanten Unterschiede (Tukey-test, $P \leq 0,05$), n=4

In den Versuchen mit **photoselaktiven Folien** der Klimakammer bestätigen die Kontrollen eine positive Beeinflussung der Frisch-, Blatt- und Trockenmassen durch die Tageslichtsumme. Die Kontrolle FLh1

ausgenommen, wurde auch das Blatt:Frischmasse-Verhältnis durch steigende Tageslichtsummen erhöht. Bezüglich des Trockenmassegehaltes kann hingegen keine Tendenz beobachtet werden. Die Lichtmodifizierung durch Überdeckung mit Folien bei unterschiedlichen Lichtintensitäten beeinflusste die Biomassen unterschiedlich. Die Folienvariante HMG72% führte zu keinen signifikanten Veränderungen der Wachstumsparameter im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle. Die Folienvariante HMG55% bewirkte tendenzielle Verringerungen der Frisch- und Blattmasse und eine signifikante Reduktion der Trockenmasse, bedingt durch eine ebenfalls signifikante Verringerung des Trockenmassegehalts (%). Deutlicher war die Wirkung der PL-Folie. Obgleich bei der Variante PL57% die Tageslichtsumme ähnlich reduziert wurde wie bei der Variante HMG55%, wurden Frisch-, Blatt- und Trockenmasse signifikant verringert, der Trockenmassegehalt hingegen nicht. Ähnliche Beobachtungen können bei der Folienvariante PL40% gemacht werden, wobei die Reduktionen deutlich höher ausfielen als bei der Variante PL57%. Dies ist ein weiteres Indiz für die Beeinflussung der Frisch-, Blatt- und Trockenmassen durch die Tageslichtsumme.

Tabelle 5.56: Beeinflussung auf die Wachstumsparameter von *P. odorata* durch Überdeckung mit photoselektiven Folien: nach drei Wochen, kultiviert in der Klimakammer (Versuchsjahr 2013) unter kontrollierten Bedingungen (FM= Frischmasse; BM= Blattmasse; BM:FM= Blatt:Frischmasse-Verhältnis; TM= Trockenmasse; TM%= Trockenmassegehalt)

Variante*	LICHT-BEDINGUNGEN**		WACHSTUMSPARAMETER***				
	PAR-Wert [$\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$]	Tageslichtsumme [$\text{mol m}^{-2}\text{d}^{-1}$]	FM [g/ Pflanze]	BM [g/ Pflanze]	BM:FM	TM [g/ Pflanze]	TM% [%]
FLh1	113,1	6,51	43,40 \pm 4,20	32,57 \pm 3,98	0,75 \pm 0,02	4,16 \pm 0,52	12,76 \pm 0,17
HMG72%	81,43	4,69	45,25 \pm 2,09	30,47 \pm 3,97	0,67 \pm 0,06	3,86 \pm 0,34	12,71 \pm 0,72
FLp1	81,17	4,68	32,04 \pm 1,64	21,29 \pm 0,41	0,67 \pm 0,04	2,78 \pm 0,10	13,05 \pm 0,42
PL57%	46,27	2,67	26,10 \pm 0,22	18,45 \pm 2,04	0,71 \pm 0,08	2,47 \pm 0,08	13,50 \pm 1,22
FLh2	190,06	10,95	58,66 \pm 4,02	39,52 \pm 4,01	0,68 \pm 0,07	5,36 \pm 0,57	13,57 \pm 0,14
HMG55%	104,53	6,02	53,54 \pm 1,82	35,54 \pm 3,60	0,66 \pm 0,07	3,99 \pm 0,40	11,24 \pm 0,12
FLp2	157,31	9,06	60,78 \pm 3,21	43,15 \pm 2,17	0,71 \pm 0,01	5,03 \pm 0,52	11,65 \pm 0,98
PL40%	62,92	3,62	25,89 \pm 3,69	19,40 \pm 2,32	0,75 \pm 0,04	2,10 \pm 0,26	10,83 \pm 0,56

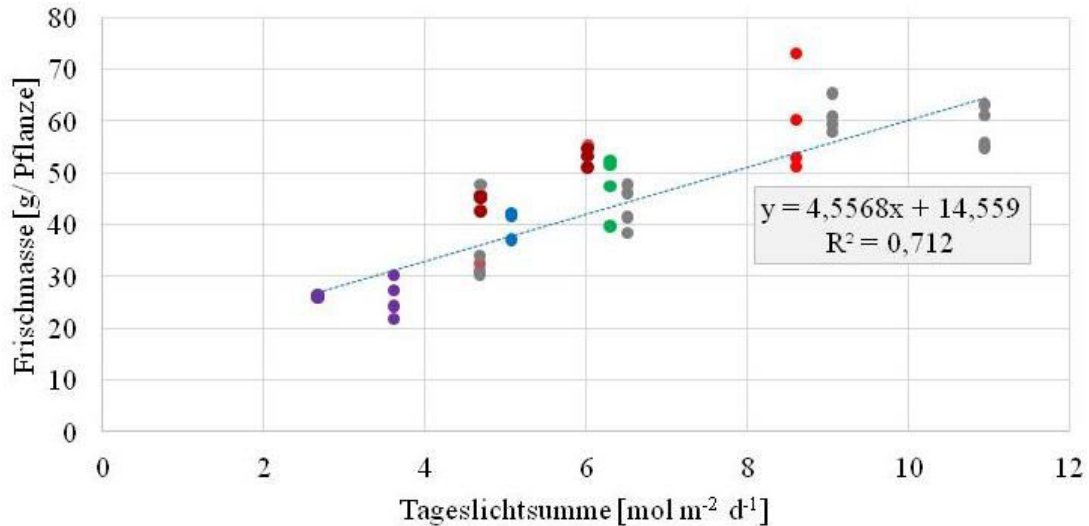
* FL+HMG72%= Überdeckung der Pflanzen mit der Half Minus Green-Folie, erreichte Lichtintensität: 72% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLh1), FL+PL57%= Überdeckung der Pflanzen mit der Pale Lavender-Folie, erreichte Lichtintensität: 57% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLp1), FL+HMG55%= Überdeckung der Pflanzen mit der Half Minus Green-Folie, erreichte Lichtintensität: 55% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLh2), FL+PL40%= Überdeckung der Pflanzen mit der Pale Lavender-Folie, erreichte Lichtintensität: 40% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLp2),

** Zu Beginn des Versuchszeitraums

*** beschrieben werden die Wachstumsparameter der Folien-Varianten im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle; Angegeben sind Mittelwerte und Standardabweichungen; unterschiedliche Buchstaben bezeichnen signifikante Unterschiede zwischen Folien-Variante und zugehöriger Kontrolle, fehlende Buchstaben bedeuten keine signifikanten Unterschiede (Tukey-test, $P \leq 0.05$), $n=4$

Basierend auf den Ergebnissen der LED- und Folienversuche in der Klimakammer zeigt auch die graphische Darstellung einen positiven Zusammenhang zwischen Tageslichtsumme und **Frishmasse** (Abbildung 5.33), bestätigt durch die partiellen Korrelationskoeffizienten (siehe Anhang, Tabelle 12.26). Zusätzlich wird eine Beeinflussung durch die spektrale Lichtzusammensetzung angedeutet. Das Lichtspektrum der HMG-Folie schien höhere Frishmassen zu bewirken als die PL-Folie. Der angedeu-

tete positive Effekt der HMG-Folie äußerte sich in signifikant positiven Korrelationen mit dem kurzwelligen Rotlichtanteil und negativen Korrelationen mit dem kurzwelligen Grünlichtanteil und dem B:R-Verhältnis (siehe Anhang, Tabelle 12.26). Die LEDs hatten, unabhängig von ihrer Wirkung auf die Tageslichtsumme, ebenfalls einen positiven Effekt, welcher sich jedoch nicht in den partiellen Korrelationen widerspiegelte.



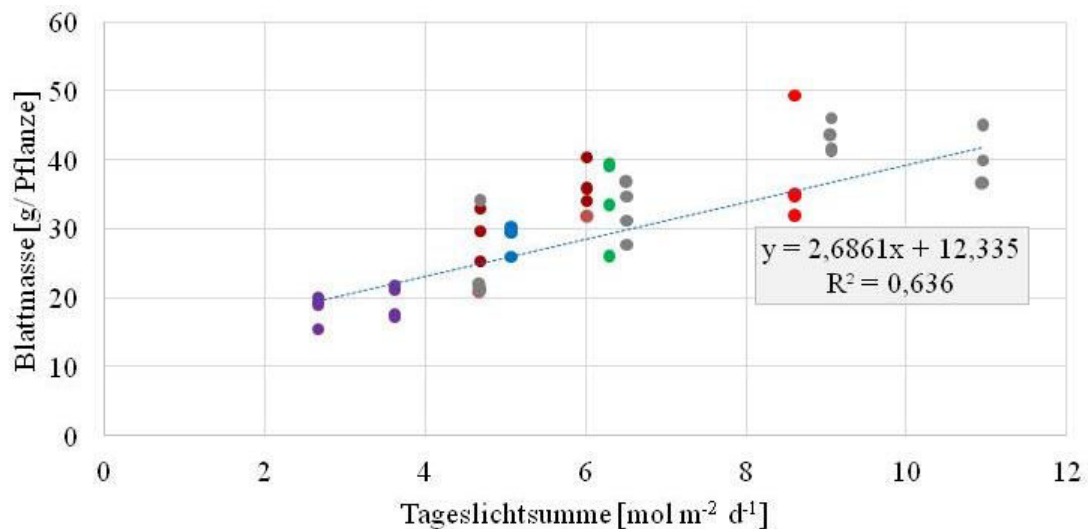


Abbildung 5.34: Zusammenhang zwischen Tageslichtsumme und der Blattmasse in der Klimakammer; Unterschiede der Lichtzusammensetzung nicht berücksichtigt. grau: FL, blau: FL+B, grün: FL+G, rot: FL+R, lila: FL+PL, dunkelrot: FL+HMG; Regressionsgerade mit Regressionskoeffizienten (R^2) und Formel bezieht sich auf die Kontrollen (grau)

Das **Blatt:Frishmasse**-Verhältnis war in der Klimakammer weitgehend unabhängig von der Tageslichtsumme (Abbildung 5.35, Tabelle 12.28). Die signifikant negative Wirkung (Tabelle 5.55) roter LEDs äußerte sich in negativen Korrelationen mit den BR:G- und R:G-Verhältnissen (Tabelle 12.28).

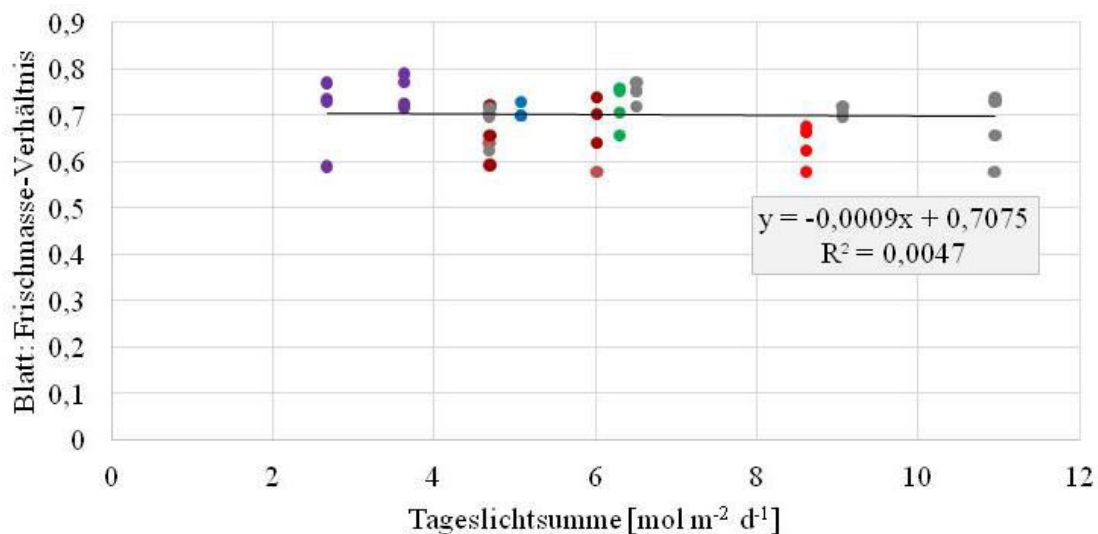


Abbildung 5.35: Zusammenhang zwischen Tageslichtsumme und Blatt:Frishmasse in der Klimakammer; Unterschiede der Lichtzusammensetzung nicht berücksichtigt. grau: FL, blau: FL+B, grün: FL+G, rot: FL+R, lila: FL+PL, dunkelrot: FL+HMG; Regressionsgerade mit Regressionskoeffizienten (R^2) und Formel bezieht sich auf die Kontrollen (grau)

Die **Trockenmasse** verhielt sich ähnlich wie Frisch- und Blattmasse und zeigt einen deutlichen, positiven Zusammenhang mit der Tageslichtsumme, wobei es, wie auch bei den anderen Biomassen, bei Tageslichtsummen $> 8 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ keinen Unterschied zwischen den Varianten gab (Abbildung 5.36). Das Lichtspektrum unter der HMG-Folie scheint einen positiven Effekt gehabt zu haben. Dies äußert sich in einer positiven Korrelation mit dem kurzwelligen Rotlichtanteil und einer negativen Korrelation mit dem B:R-Verhältnis (siehe Anhang, Tabelle 12.29). Auch grüne LEDs scheinen die Trockenmasse erhöht zu haben, wobei dies nicht durch die Korrelationskoeffizienten bestätigt wurde.

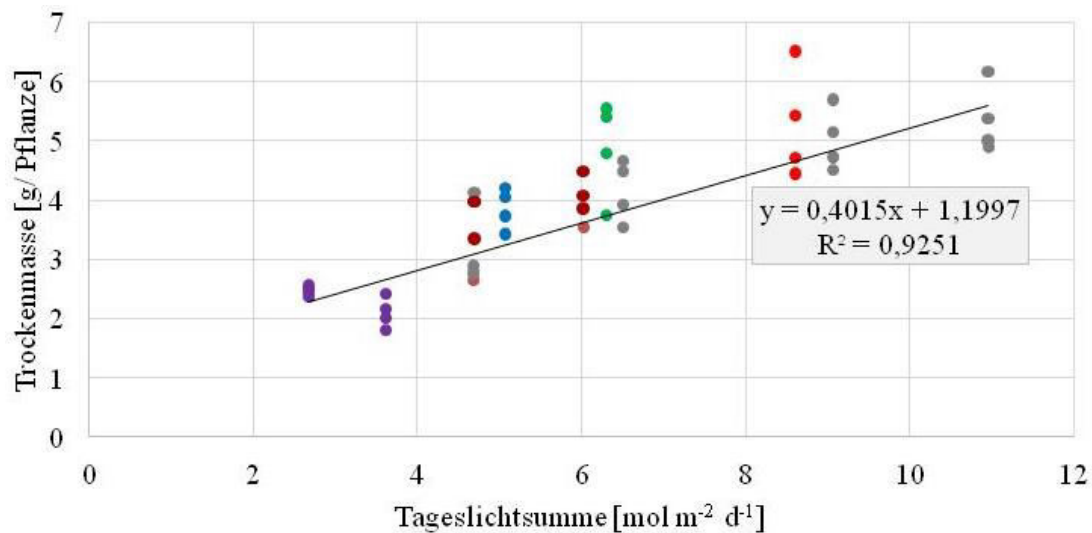


Abbildung 5.36: Zusammenhang zwischen Tageslichtsumme und der Trockenmasse [g/ Pflanze] in der Klimakammer; Unterschiede der Lichtzusammensetzung nicht berücksichtigt. Grau: FL, blau: FL+B, grün: FL+G, rot: FL+R, lila: FL+PL, dunkelrot: FL+HMG; Regressionsgerade mit Regressionskoeffizienten (R^2) und Formel bezieht sich auf die Kontrollen (grau)

Der Einfluss der Lichtbedingungen auf die **Trockenmassengehalte** der Pflanzen unterschied sich von den Biomassen. Die Tageslichtsumme zeigte keinen Einfluss auf den Trockenmassegehalt (Abbildung 5.37), bestätigt durch die Korrelationskoeffizienten (siehe Anhang, Tabelle 12.30). Im Vergleich zu Varianten mit ähnlichen Tageslichtsummen wird eine trockenmassegehaltssteigernde Wirkung grüner und roter LEDs angedeutet.

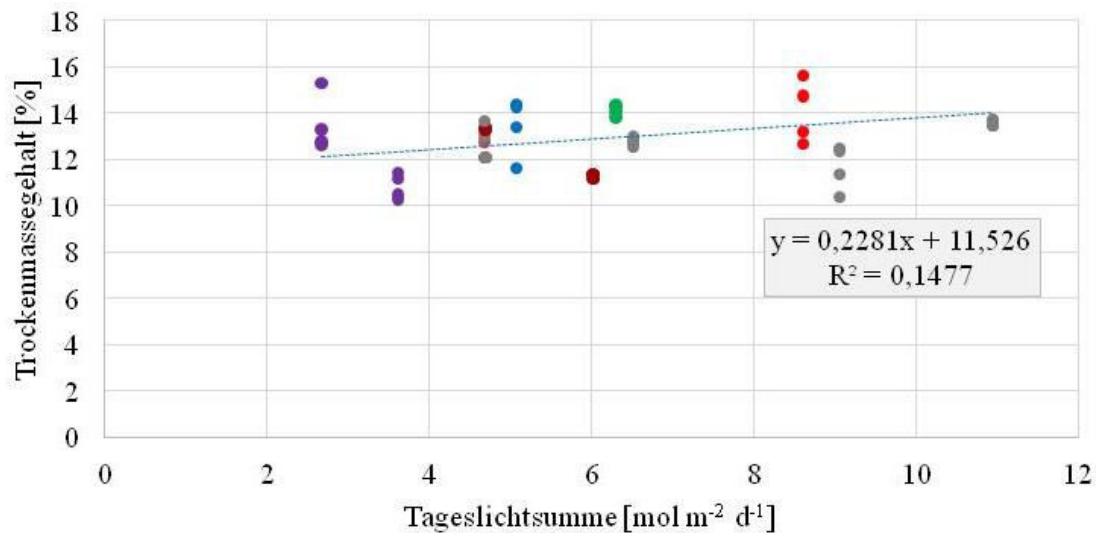


Abbildung 5.37: Zusammenhang zwischen Tageslichtsumme und dem Trockenmassegehalt [%] in der Klimakammer; Unterschiede der Lichtzusammensetzung nicht berücksichtigt. Grau: FL, blau: FL+B, grün: FL+G, rot: FL+R, lila: FL+PL, dunkelrot: FL+HMG; Regressionsgerade mit Regressionskoeffizienten (R^2) und Formel bezieht sich auf die Kontrollen (grau)

5.2.2.2 Biomasseakkumulierung im Gewächshaus

Im Gewächshaus gab es zwischen den Kontrollen der einzelnen Versuchsreihen große Spannweiten (Tabelle 5.57) der Frisch- (14,73-43,02 g/Pflanze), Blatt- (7,74-32,18 g/ Pflanze) und Trockenmassen

(0,96-4,38 g/ Pflanze) sowie beim Blatt:Frischmasse-Verhältnis (0,50-0,74). Die Trockenmassegehalte wurden hingegen kaum durch die Bedingungen beeinflusst (12,75-14,86%).

Zusätzliche Bestrahlungen mit **LEDs** hatten unterschiedliche Wirkungen. Blaue LEDs bewirkten in den Versuchsreihen „GwH14“, „GwH14, nachts“ und „GwH14, 24h“ signifikante Steigerungen der Frisch-, Blatt- und Trockenmassen im Vergleich zu den Kontrollen. In der Versuchsreihe „GwH13“ führten blaue LEDs zu einer signifikanten Verringerung des Trockenmassegehalts. Grüne LEDs bewirkten im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle signifikante Erhöhungen der Frisch- („GwH14“, „GwH14, 24h“) und Blattmassen („GwH14, 24h“). In der Versuchsreihe „GwH13“ führten grüne LEDs hingegen zu signifikant geringeren Frisch-, Blatt- und Trockenmassen. Ähnlich wie die blauen LEDs bewirkten rote LEDs signifikante Steigerungen der Frisch- („GwH14“, „GwH14, nachts“, „GwH14, 24h“), Blatt- („GwH14“, „GwH14, nachts“, „GwH14, 24h“) und Trockenmassen („GwH14, nachts“, „GwH14, 24h“). In der Versuchsreihe „GwH13“ wurde die Trockenmasse signifikant verringert. In den Versuchsreihen des Jahres 2014 bewirkten alle LEDs eine signifikante Verringerung der Blatt:Frischmasse-Verhältnisse.

Tabelle 5.57: Beeinflussung der Biomasseakkumulierung von *P. odorata* durch zusätzliche LED-Beleuchtung (B=Blau, G=Grün, R=Rot): nach drei Wochen (FM= Frischmasse; BM= Blattmasse; BM:FM= Blatt:Frischmasse-Verhältnis; TM= Trockenmasse; TM%= Trockenmassegehalt)

Variante		BEDINGUN- GEN*		WACHSTUMSPARAMETER**				
		TLS [mol m ⁻² d ⁻¹]	TT [°C]	FM [g/ Pflanze]	BM [g/ Pflanze]	BM:FM	TM [g/ Pflanze]	TM% [%]
GwH13	NL	41,55 ±11,14	30,0	43,02 ^{ab} ±2,24	32,18 ^{ab} ±1,23	0,74±0,05	4,38 ^a ±0,12	13,43 ^a ±0,51
	NL+B	42,18		44,71 ^a ±3,52	33,97 ^a ±2,19	0,76±0,02	4,26 ^a ±0,16	12,04 ^{bc} ±0,59
	NL+G	41,95		37,16 ^c ±3,07	28,79 ^c ±1,88	0,77±0,02	3,50 ^b ±0,31	12,61 ^{ab} ±0,24
	NL+R	42,24		40,04 ^{bc} ±1,33	30,62 ^{bc} ±2,27	0,76±0,03	3,48 ^b ±0,21	11,26 ^c ±0,37
GwH14	NL	36,38 ±4,72	26,6	41,00 ^b ±3,30	21,93 ^b ±1,37	0,54 ^a ±0,02	3,27 ^b ±0,29	14,86 ^{ab} ±0,28
	NL+B	37,01		53,37 ^a ±2,71	26,59 ^a ±1,07	0,50 ^b ±0,01	4,25 ^a ±0,59	15,90 ^a ±1,70
	NL+G	36,78		48,49 ^a ±2,67	22,82 ^b ±1,35	0,47 ^c ±0,02	3,19 ^b ±0,15	14,06 ^{ab} ±0,45
	NL+R	37,07		52,36 ^a ±3,94	26,46 ^a ±2,01	0,51 ^b ±0,02	3,59 ^{ab} ±0,58	13,62 ^b ±0,93
GwH14, nachts	NL	9,27 ±4,34	22,0	14,73 ^b ±1,84	7,74 ^b ±0,91	0,50 ^a ±0,01	0,96 ^c ±0,14	12,75±0,14
	NL+B	9,75		21,64 ^a ±2,56	9,74 ^a ±1,00	0,45 ^b ±0,01	1,32 ^a ±0,15	13,14±0,17
	NL+G	9,57		16,68 ^b ±1,96	7,59 ^b ±1,02	0,45 ^b ±0,01	0,96 ^c ±0,03	13,17±0,51
	NL+R	9,79		20,76 ^a ±1,98	9,32 ^a ±0,91	0,45 ^b ±0,01	1,23 ^b ±0,05	12,74±0,31
GwH14, 24h	NL	31,09 ±11,48	23,8	22,06 ^b ±1,86	11,89 ^c ±1,18	0,59 ^a ±0,06	1,68 ^b ±0,14	13,95±0,60
	NL+B	32,04		34,50 ^a ±1,83	16,22 ^a ±1,03	0,47 ^b ±0,02	2,03 ^a ±0,41	12,84±2,88
	NL+G	31,69		30,81 ^a ±1,79	14,10 ^b ±0,96	0,46 ^b ±0,02	1,93 ^{ab} ±0,22	13,77±1,06
	NL+R	32,13		33,75 ^a ±1,89	16,23 ^a ±0,74	0,48 ^b ±0,03	2,32 ^a ±0,50	14,38±3,9

*Durchschnittliche Tageslichtsummen (TLS) und Tagestemperatur (TT) der Kontrolle, berechnet für den gesamten Versuchszeitraum

**Angegeben sind Mittelwerte und Standardabweichungen; kursiv geschrieben: prozentuale Veränderungen im Vergleich zur Kontrolle; unterschiedliche Buchstaben bezeichnen signifikante Unterschiede innerhalb einer Versuchsreihe zwischen Behandlungen, fehlende Buchstaben bedeuten keine signifikanten Unterschiede (Tukey-test, P≤0.05), n=4

Überdeckungen mit **photoselektiven Folien** führten zu Reduktionen der Biomassen (Tabelle 5.58). In der Versuchsreihe „GwH13“ wurden Frisch-, Blatt- und Trockenmassen durch beide Folien signifikant verringert, wobei die Reduktion durch die PL-Folie stärker war. Das Blatt:Frischmasse-Verhältnis sowie

der Trockenmassegehalt wurden im Vergleich zur Kontrolle jedoch nicht signifikant beeinflusst. Die Variante NL-PL hatte jedoch einen signifikant höheren Trockenmassegehalt als die Variante NL-HMG. In der Versuchsreihe „GwH14“ wurden die Biomassen ebenfalls tendenziell durch die Folien reduziert, signifikant waren die Veränderungen jedoch nur bei der Blattmasse.

Tabelle 5.58: Beeinflussung der Biomasseakkumulierung von *P. odorata* durch Überdeckung mit photoselektiver Folie (HMG=Half Minus Green, PL=Pale Lavander): nach drei Wochen (FM= Frischmasse; BM= Blattmasse; BM:FM= Blatt:Frischmasse-Verhältnis; TM= Trockenmasse; TM%= Trockenmassegehalt)

	Variante	BEDINGUNGEN*		WACHSTUMSPARAMETER**				
		TLS* [mol m ⁻² d ⁻¹]	TT [°C]	FM [g/ Pflanze]	BM [g/ Pflanze]	BM:FM	TM [g/ Pflanze]	TM% [%]
GwH13	NL	41,55 ±11,14	30,0	43,02 ^a ±2,24	32,18 ^a ±1,23	0,74±0,05	4,38 ^a ±0,12	13,43 ^{ab} ±0,51
	NL-HMG	32,37		28,73 ^b ±3,33	21,68 ^b ±1,76	0,75±0,05	2,83 ^b ±0,24	12,81 ^b ±0,20
	NL-PL	22,40		24,24 ^c ±2,62	18,19 ^c ±1,31	0,75±0,06	2,46 ^b ±0,20	13,57 ^a ±0,22
GwH14	NL	36,38 ±4,72	26,6	41,00±3,30	21,93 ^a ±1,37	0,54 ^a ±0,02	3,27 ^a ±0,29	14,86±0,28
	NL-HMG	28,34		39,48±2,62	18,88 ^b ±1,88	0,48 ^b ±0,02	2,62 ^b ±0,30	14,63±1,55
	NL-PL	19,61		38,70±5,75	17,68 ^b ±2,20	0,46 ^b ±0,03	2,80 ^{ab} ±0,38	15,15±0,91

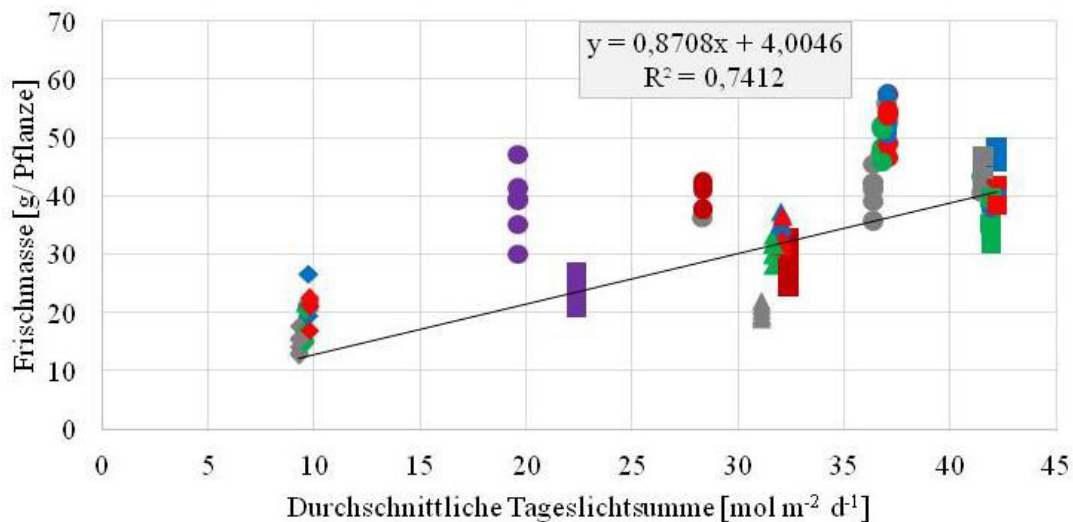
*Durchschnittliche Tageslichtsummen (TLS) und Tagestemperatur (TT) der Kontrolle, berechnet für den gesamten Versuchszeitraum

**Angegeben sind Mittelwerte und Standardabweichungen; kursiv geschrieben: prozentuale Veränderungen im Vergleich zur Kontrolle; unterschiedliche Buchstaben bezeichnen signifikante Unterschiede innerhalb einer Versuchsreihe zwischen Behandlungen, fehlende Buchstaben bedeuten keine signifikanten Unterschiede (Tukey-test, $P \leq 0.05$), $n=4$

Die graphische Darstellung der **Frishmassen** aller Varianten und Versuchsreihen im Gewächshaus in Abhängigkeit von den Tageslichtsummen veranschaulicht die Ergebnisse und den positiven Zusammenhang (Abbildung 5.38). Die Regressionsgerade beschreibt eine Erhöhung der Frischmasse um 0,96% bei einer Erhöhung der Tageslichtsumme um 1% und liegt folglich in dem von MARCELIS et al.(2006) abgesteckten Bereich, in dem eine Erhöhung der Lichtintensität um 1% mit einer artspezifischen Produktionssteigerung von 0,5-1% einhergeht. Das Bestimmtheitsmaß für den Zusammenhang zwischen Frischmasse und Tageslichtsumme ist signifikant ($R^2=0,74$, siehe Anhang, Tabelle 12.25) und bestätigt die Beobachtungen anderer Studien mit anderen Spezies (COCKSHULL et al., 1992; LORENZ und WIEBE, 1980). Die abweichenden Frishmassen in der Versuchsreihe „GwH14, 24h“ (Abbildung 5.38) deuten jedoch darauf hin, dass weitere Kultivierungsparameter die Ergebnisse beeinflusst haben. Im Vergleich zur Versuchsreihe „GwH14“ war die durchschnittliche Tageslichtsumme um $5,29 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ reduziert (entspricht 14,5%), die Frischmasse um $20,72 \text{ g/ Pflanze}$ (entspricht 50,5%). Die Regressionsgerade hätte eine Frishmassereduktion von $9,64 \text{ g/ Pflanze}$ erwarten lassen. Die berechneten multiplen Korrelationskoeffizienten (siehe Anhang, Tabelle 12.25) deuten diesbezüglich einen Einfluss der Tages- und Nachttemperatur an. Für alle drei Parameter liegt das Bestimmtheitsmaß bei $R^2=0,97$. In der Versuchsreihe „GwH14, 24h“ lag die mittlere Tagestemperatur im Bereich der Versuchsreihe „GwH14, nachts“ und war geringer als in den Versuchsreihen „GwH13“ und „GwH14“. Folglich sollten steigende Tages- und Nachttemperaturen einen frishmassesteigernden Effekt gehabt haben. Ein positiver Zusammenhang zwischen Frishmasseakkumulation und Temperatur in einem bestimmten Bereich wurde bei anderen Pflanzen beobachtet (KÖRNER, 2006; LEFSRUD et al., 2006; ZISKA und BUNCE, 1994) und wird

zurückgeführt auf einen linearen Zusammenhang zwischen Photosyntheserate und der Temperatur bis zu einem bestimmten Wert (HALDIMANN, 1999; LORENZ und WIEBE, 1980; YAMORI et al., 2005). Möglicherweise wurde die photosynthetische Energiegewinnung in der Versuchsreihe „GwH14, 24h“ durch vergleichsweise geringere Temperaturen als bei der Versuchsreihe „GwH14“ limitiert. Zusätzlich wurden durch LAING et al. (2017) auch geringere Nachttemperaturen (5°C) mit einer geringeren Frischmassebildung assoziiert als hohe Nachttemperaturen (23°C). Übertragen auf die vorliegenden Versuche lag die mittlere Nachttemperatur in der Versuchsreihe „GwH14“ bei 21,2°C, in der Versuchsreihe „GwH14, 24“ bei 19,1°C und in der Versuchsreihe „GwH14, nachts“ bei 18,7°C und könnte dadurch die Frischmassebildung zusätzlich beeinflusst haben. Hohe Temperaturen können jedoch auch zu rapide steigenden Photorespirationsraten führen (LORENZ und WIEBE, 1980; YAMORI et al., 2005), die Photosyntheserate reduzieren (CAMEJO et al., 2005; LORENZ und WIEBE, 1980; LUDLOW und WILSON, 1971) und durch eine Inaktivierung der Phytochrome die rotlichtinduzierte, phytochromevermittelte Stomataöffnung hemmen (JUNG et al., 2016; LEGRIS et al., 2016). Vor allem heiße Temperaturen während der Mittagsstunden (*Mittagsdepression*) führen durch Reduktion der stomatären Leitfähigkeit zu einer Verminderung der Photosyntheserate (PONS und WELSCHEN, 2003). Ob es dazu gekommen ist, lässt sich nicht belegen. Aufgrund zeitweiser hoher Temperaturen in der Versuchsreihe „GwH13“ ist es möglich und könnte den vergleichweisen geringen Anstieg der Frischmasse im Vergleich zur Versuchsreihe „GwH14“ erklären. Ein weiterer möglicher Einflussfaktor ist die Luftfeuchtigkeit (MORTENSEN und GISLERØD, 2000; TROMP und OELE, 1972). Bei den vorliegenden Ergebnissen ist das Bestimmtheitsmaß für den Zusammenhang zwischen Frischmasse und Tages- und Nachtluftfeuchtigkeit etwas geringer ($R^2=0,85$) als für den Zusammenhang zwischen Frischmasse und Tages- und Nachttemperatur ($R^2=0,93$). Eine Beeinflussung ist folglich denkbar, vermutlich jedoch weniger stark als durch die Temperaturen. Unabhängig davon scheint eine Zusatzbestrahlung mit LEDs in der Versuchsreihe „GwH14, 24“ das Potenzial zu haben, vermutlich auf niedrige Temperaturen beruhende, Frischmassereduktionen zu kompensieren.

Weiterhin sollte bedacht werden, dass nicht nur die Photosyntheseleistung durch längere Nächte bzw. geringere Tageslichtsummen verringert wird. Auch die photomorphogenesehemmenden PI-Faktoren, mit einem Aktivitätsmaximum in den Morgenstunden (NUSINOW et al., 2012), können länger wirken und beeinträchtigen u. a. die Stomataöffnungen, wodurch der Aufbau von Biomasse zusätzlich verringert wird. Dies könnte andersrum auch eine Erklärung für die stärkere Wirkung der LEDs in den Versuchsreihen „GwH14, nachts“ und „GwH14, 24h“, die vermutlich zu einer Verringerung der PIF-Aktivitäten beitragen.



Zusammenhang mit der Tages- und Nachttemperatur ($R^2=0,99$). Eine Beeinflussung durch die Luftfeuchtigkeit ist folglich nicht ausgeschlossen und zumindest für Schnittrosen wurde eine Vergrößerung der Blattflächen bei höheren Luftfeuchtigkeiten nachgewiesen (MORTENSEN und GISLERØD, 2000).

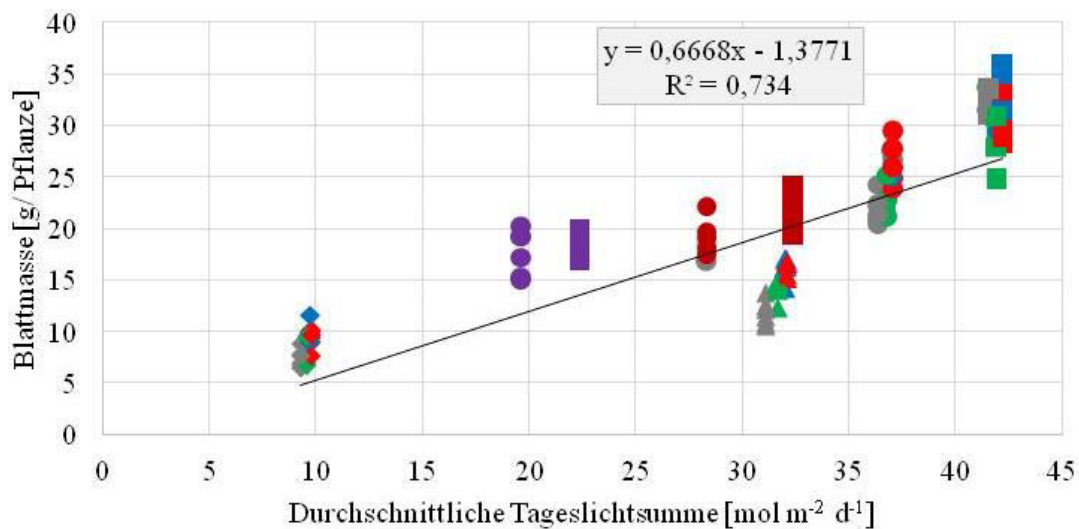


Abbildung 5.39: Zusammenhang zwischen durchschnittlicher Tageslichtsumme und Blattmasse [g/Pflanze] der Kontrollen im Gewächshaus; Quadrate: „GwH13“, Kreise: „GwH14“, Rauten: „GwH14, nachts“, Dreiecke: „GwH14, 24h“; Regressionsgerade mit Regressionskoeffizienten (R^2) und Formel bezieht sich auf die Kontrollen (grau)

Wie auch die Frisch- und Blattmassen korreliert die **Trockenmasse** (Abbildung 5.40) signifikant positiv mit der Tageslichtsumme ($R^2=0,77$). Ferner zeigen die multiplen Korrelationen (siehe Anhang, Tabelle 12.25), dass auch die Temperatur die Trockenmasse signifikant beeinflusste ($R^2=0,99$) bzw. die Kombination von Tageslichtsumme, Tages- und Nachttemperatur ($R^2=0,99$). Da der Trockenmassegehalt keinen Zusammenhang mit der Tageslichtsumme zeigte (Abbildung 5.42), wird die Erhöhung der Trockenmasse bei steigender Tageslichtsumme und Temperatur auf einer gesteigerten Blattmassebildung begründet sein.

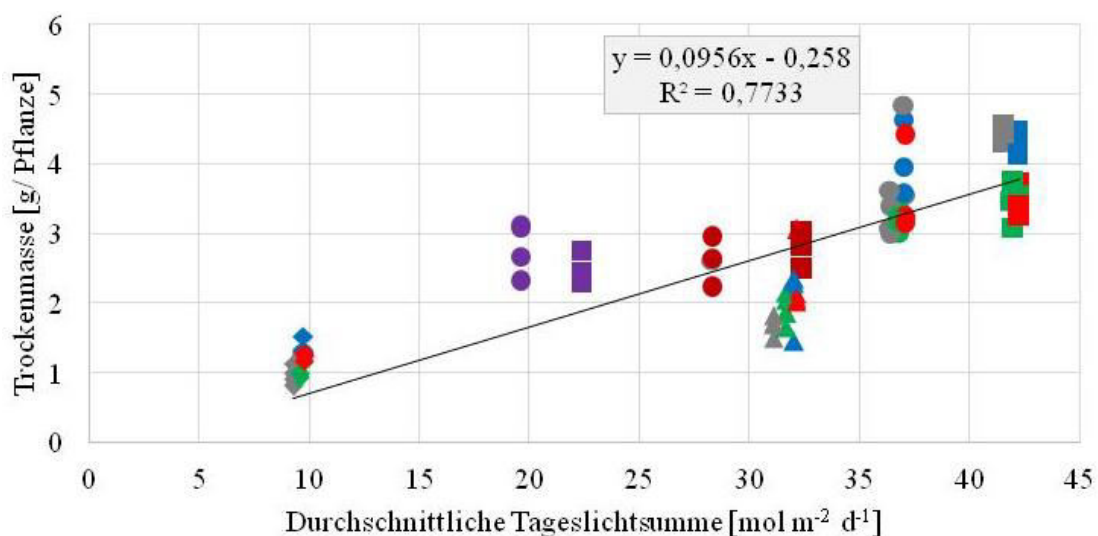


Abbildung 5.40: Zusammenhang zwischen durchschnittlicher Tageslichtsumme und Trockenmasse [g/Pflanze] der Kontrollen im Gewächshaus; grau: „GwH13“, lila: „GwH14“, blau: „GwH14, nachts“, grün: „GwH14, 24h“; Regressionsgerade mit Regressionskoeffizienten (R^2) und Formel bezieht sich auf die Kontrollen (grau)

Der Vergleich der Kontrollen der Gewächshausversuchsreihen untereinander zeigt das höchste **Blatt:Frischmasse**-Verhältnis in der Versuchsreihe „GwH13“ (75%), gefolgt von „GwH14“ (61%), „GwH14, 24h“ (54%) und „GwH14, nachts“ (50%). Die graphische Darstellung (Abbildung 5.41) bestätigt den positiven Zusammenhang zwischen Blatt:Frischmasse-Verhältnis und der Tageslichtsumme, ebenso wie das entsprechende Bestimmtheitsmaß ($R^2=0,51$, siehe Anhang, Tabelle 12.25). Eine Umverteilung der Biomasse zu Gunsten der Stängel durch sinkende Lichtintensitäten (BUTTROSE, 1968; POTTER et al., 1999) bzw. Schattenbedingungen (CORRÉ, 1983) wurde bei anderen Spezies beobachtet. Aufgrund der fördernden Wirkung von Gibberellinsäure auf das Stängelwachstum und seine umkehrende Wirkung auf die lichtinduzierte Stängelwachstumshemmung (KENDE und LANG, 1964; LOCKHART, 1956; XU et al., 1997) wurde das verstärkte Stängelwachstum durch POTTER et al.(1999) auf steigende Gibberellinsäuregehalte bei sinkenden Lichtintensitäten zurückgeführt. In der Versuchsreihe „GwH13“ wurde die Biomasseverteilung zu Gunsten der Blattmasse möglicherweise zusätzlich unterstützt durch die vergleichsweise hohen Temperaturen ($R^2=0,91$ für Tageslichtsummen, Tages- und Nachttemperatur), die ebenfalls mit einem verstärkten Blattwachstum und kleineren Stängeln (BUTTROSE, 1968) sowie einer Aufteilung der Trockenmasse zwischen Blättern und dem Rest der Pflanze zu Gunsten der Blätter (DALE, 1965) assoziiert werden. Wie auch bei der Blattmasse korrelierte das Blatt:Frischmasse-Verhältnis stärker mit der Tages- und Nachttemperatur ($R^2=0,85$) als mit der Tages-/ Nachtluftfeuchtigkeit ($R^2=0,34$).

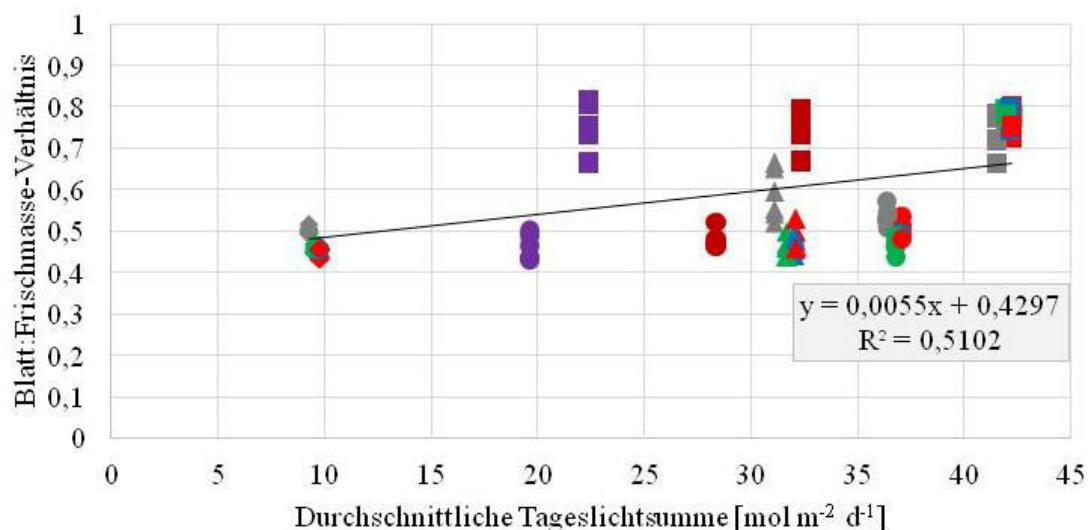


Abbildung 5.41: Zusammenhang zwischen durchschnittlicher Tageslichtsumme und Blatt:Frischmasse-Verhältnis der Versuchsreihen im Gewächshaus; Quadrate: „GwH13“, Kreise: „GwH14“, Rauten: „GwH14, nachts“, Dreiecke: „GwH14, 24h“; Regressionsgerade mit Regressionskoeffizienten (R^2) und Formel bezieht sich auf die Kontrollen (grau)

Von allen betrachteten Wachstumsparametern wurde der **Trockenmassegehalt** am wenigsten durch die Tageslichtsumme und Lichtmodifizierungen beeinflusst. Dies deutet auf eine gleichbleibende, haptische Qualität bei den untersuchten Lichtbedingungen hin. Entsprechend wurde nur ein geringes Bestimmtheitsmaß für den Zusammenhang zwischen Tageslichtsumme und Trockenmassegehalt berechnet ($R^2=0,41$, siehe Anhang, Tabelle 12.25). Abweichungen der Trockenmassegehalte in den Kontrollen

der Versuchsreihen „GwH14“ und „GwH14, 24h“ deuten eine Beeinflussung durch weitere Kultivierungsbedingungen an. Das höchste Bestimmtheitsmaß wurde bei einer Berücksichtigung der Tageslichtsumme, Tages- und Nachttemperatur bzw. Tages- und Nachtluftfeuchtigkeit berechnet ($R^2=0,86$). Die unterschiedlichen Bestimmtheitsmaße für den Zusammenhang zwischen Trockenmassegehalt und Tages- und Nachttemperatur ($R^2=0,26$) sowie Tages- und Nachtluftfeuchtigkeit ($R^2=0,55$) deuten jedoch darauf hin, dass, anders als bei den anderen Wachstumsparametern, die Luftfeuchtigkeit einen größeren Einfluss ausübte als die Temperatur.

In der Literatur wird mehrheitlich ein negativer Zusammenhang zwischen Trockenmassegehalt und Luftfeuchtigkeit beschrieben (MORTENSEN, 1986; NEJAD und VAN MEETEREN, 2007), während die Trockenmasse pro Pflanze mitunter positiv mit der Luftfeuchtigkeit assoziiert wird (MORTENSEN, 1986). Relevant sein können diesbezüglich eine negative Wirkung hoher Luftfeuchtigkeiten auf die Transpirationsrate und dadurch auf die Nährstoffgehalte in Blättern (GISLERÖD et al., 1987; TROMP und OELE, 1972) und Stielen (MORTENSEN und GISLERÖD, 2000) verschiedener Spezies. Die bestimmten anorganischen Substanzen (Calcium, Eisen, Kalium, Magnesium, Phosphor, Nitrat) machten etwa 10% der Trockenmasse aus, sodass zumindest eine negative Beeinflussung des Trockenmassegehalts durch eine Reduktion der Mineralstoffgehalte denkbar ist.

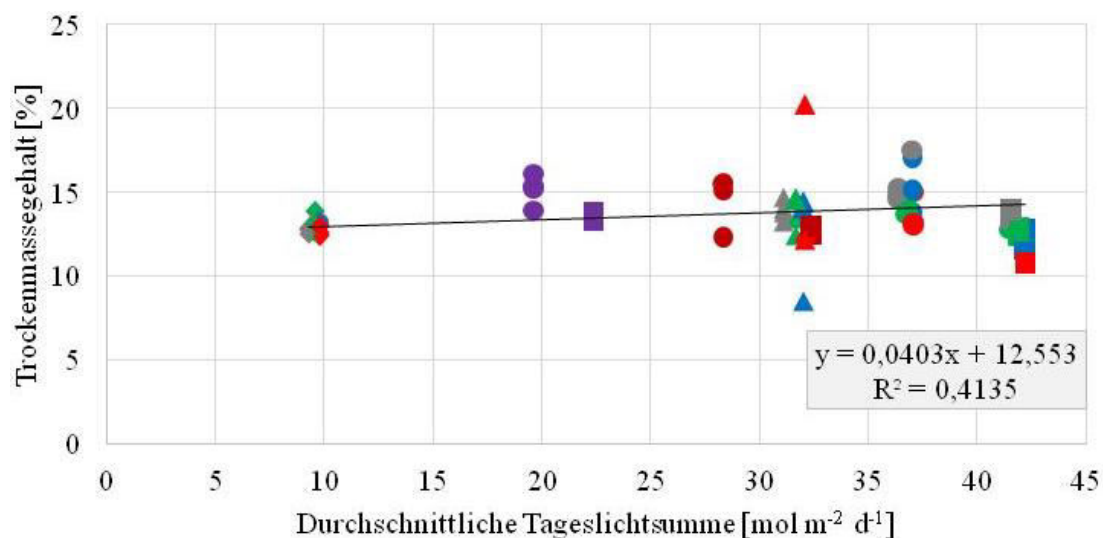


Abbildung 5.42: Zusammenhang zwischen durchschnittlicher Tageslichtsumme und Trockenmassegehalt [%] der Kontrollen im Gewächshaus; grau: „GwH13“, lila: „GwH14“, blau: „GwH14, nachts“, grün: „GwH14, 24h“; Regressionsgerade mit Regressionskoeffizienten (R^2) und Formel bezieht sich auf die Kontrollen (grau)

5.2.2.3 Diskussion der Biomasseakkumulierung

Die vorliegenden Ergebnisse bestätigen die Ergebnisse der Studie von STUEFER und HUBER (1998), die als wichtigsten Faktor der Biomassebildung die Lichtintensität beschreiben. In den meisten Versuchsreihen wurde ein eindeutig positiver Einfluss steigender **Tageslichtsummen** auf Frisch-, Blatt- und Trockenmassen dargestellt, bestätigt durch die gemittelten Korrelationskoeffizienten für die einzelnen

Wachstumsparameter (siehe Anhang, Tabelle 12.26, Tabelle 12.27, Tabelle 12.29). Während der Vergleich der Versuchsreihen im Gewächshaus einen tendenziell positiven Einfluss der Tageslichtsumme auf das Blatt:Frischmasse-Verhältnis zeigt, wurde dies in den einzelnen Versuchsreihen, vornehmlich aufgrund der Blatt:Frischmasse-Verhältnis-reduzierenden Wirkung der LEDs, nicht bestätigt (Tabelle 12.28). Wie in Abbildung 5.37 und Abbildung 5.42 dargestellt, kann auch für den Trockenmassegehalt kein Zusammenhang mit der Tageslichtsumme dargestellt werden.

Aufgrund einer höheren Verfügbarkeit von Photosynthaten bei steigenden **Tageslichtsummen** (STUEFER und HUBER, 1998) entsprechen die Biomassesteigerungen den Erwartungen und Ergebnissen anderer Forschungsgruppen (GISLERØD et al., 1989; MARCELIS et al., 2006; STUEFER und HUBER, 1998). Standortabhängig beeinflusste die Tageslichtsumme die Biomasseakkumulation unterschiedlich stark, dargestellt in den Steigerungen der Regressionsgeraden. Bei beiden Versuchsstandorten lag die Frischmassesteigerung bei einer Erhöhung der Tageslichtsumme um 1% in dem von MARCELIS et al.(2006) beschriebenen Bereich. Jedoch war die erreichte Steigerung versuchsreihenübergreifend mit 0,96% im Gewächshaus (Abbildung 5.38) deutlich höher als in der Klimakammer mit 0,64% (Abbildung 5.33). Möglicherweise können die Diskrepanzen auf Wechselwirkungen mit anderen Kultivierungsparametern beruhen. In der Klimakammer waren Temperatur und Luftfeuchtigkeit, unabhängig von der Tageslichtsumme, konstant. Im Gewächshaus gingen hohe Tageslichtsummen (Abbildung 4.9, Abbildung 4.10) hingegen meist einher mit höheren Tages- und Nachttemperaturen (Abbildung 4.13). Die multiplen Korrelationskoeffizienten bestätigen einen starken Einfluss der Temperatur gemeinsam mit der Tageslichtsumme (siehe Anhang, Tabelle 12.25). Interaktionen zwischen steigenden Lichtintensitäten und Temperaturen werden in der Literatur für andere Pflanzenspezies beschrieben (CAMPBELL und READ, 1968; DIELEMAN und MEINEN, 2007; RIBEIRO et al., 2006; YAN et al., 2013). Ein paralleler Anstieg von Lichtintensität und Temperatur führt bis zu einem pflanzenabhängigen Wert zu einer steigenden Photosyntheserate (RIBEIRO et al., 2006) und Biomassebildung (CHU und TOOP, 1975). Zudem wurde eine Erhöhung der Nährstoffaufnahme durch einen Temperaturanstieg beobachtet (CHU und TOOP, 1975). Eine Steigerung der Lichtintensität bei gleichbleibender Temperatur kann hingegen ein schnelleres Erreichen des Lichtsättigungspunktes bewirken (RIBEIRO et al., 2006), was möglicherweise in der Klimakammer dazu geführt hat, dass es bei Tageslichtsummen $> 8 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ keine Erhöhung der Frischmasse gab (Abbildung 5.33). Die synergistische Wirkung von Bestrahlungsstärke und Temperatur auf die Frischmasseakkumulation (AGATA et al., 1985) könnte im Gewächshaus somit stärker ausgefallen sein als in der Klimakammer, in der die Temperatur, unabhängig von der Bestrahlungsstärke, immer gleich hoch war. Es können jedoch auch weitere Faktoren dazu beigetragen haben, dass eine Erhöhung der Tageslichtsumme in der Klimakammer eine geringere Wirkung hatte als im Gewächshaus. Möglicherweise war, trotz Belüftung der Klimakammern, die CO_2 -Konzentration zeitweise ein limitierender Faktor für die photosynthetische CO_2 -Fixierung. Daneben werden vermutlich auch die deutlichen Unterschiede der spektralen Lichtzusammensetzung zwischen Sonnenlicht und Dreiband-Leuchtstoffröhren eine wichtige Rolle gespielt haben (s. u.).

Anders als Frisch-, Blatt- und Trockenmasse wurde der Trockenmassegehalt nicht durch die Tageslichtsummen beeinflusst. Da in den meisten Studien die Trockenmasse und nicht der Trockenmassegehalt beschrieben wurde, gibt es diesbezüglich nur wenige Literaturstellen, die insgesamt tendenziell einen positiven Zusammenhang zwischen Trockenmassegehalt und Lichtintensität beschreiben (GRAHL und WILD, 1973; LICHTENTHALER et al., 1981), begründet mit der verstärkten Bildung xeromorpher Strukturen, die eine Verminderung der kurzwelligen Strahlung im Blattinnern bewirken und vor Zerstörungen des Photosyntheseapparats durch energiereiche Strahlung schützen.

Während der Zusammenhang zwischen Tageslichtsumme und der Biomasseakkumulierung versuchsreihenübergreifend vergleichbar war, sind die Korrelationskoeffizienten im Hinblick auf eine Beeinflussung durch die spektrale Lichtzusammensetzung nicht eindeutig. Gleiche Biomassen in der Klimakammer bei deutlich geringeren Tageslichtsummen als im Gewächshaus und die LED-Versuche (Tabelle 5.55, Tabelle 5.57) belegen jedoch, dass das Lichtspektrum einen wichtigen Einfluss auf das Pflanzenwachstum hatte. Bezogen auf die Versuchsreihe „GwH14“ bewirkte die zusätzliche Bestrahlung mit **blauen** LEDs eine Erhöhung der durchschnittlichen Tageslichtsumme um 1,71%, die Frischmasse wurde jedoch um 30% erhöht. Dies entspricht einer Frischmassesteigerung von 17,5% bei einer Erhöhung der Tageslichtsumme um 1% durch Supplementierung mit kurzwelligem Blaulicht. Dies einzig auf die Erhöhung der Tageslichtsumme zurückzuführen, scheint nach MARCELIS et al.(2006) unwahrscheinlich, da in dieser Veröffentlichung eine Erhöhung der Lichtintensität um 1% mit einer pflanzenabhängigen Produktionssteigerung von 0,5-1% assoziiert wird. Vielmehr wird durch die Ergebnisse eine zusätzliche Förderung der Frisch-, Blatt- und Trockenmasseakkumulierung durch eine Verstärkung des Blaulichtanteils, insbesondere des kurzwelligen Blaulichtanteils beschrieben. Dieser zeigte insgesamt die höchste steigernde Wirkung auf die Akkumulation von Frisch-, Blatt- und Trockenmasse. Bei einer Erhöhung der Tageslichtsumme um 1% durch eine Supplementierung mit kurzwelligen Blaulicht wurde die Frischmasse in den Gewächshausversuchen um durchschnittlich 13%, die Blattmasse um 8,5% und die Trockenmasse um 9,3% erhöht (Tabelle 6.2). Damit bestätigt die vorliegende Arbeit Untersuchungen mit anderen Spezies (BÖHME et al., 2015; MANIVANNAN et al., 2015; MUNEER et al., 2014; OGAWA, 1981a), bei denen die biomassesteigernde Wirkung des blauen Spektralbereichs auf eine Erhöhung der Blattanzahl (MANIVANNAN et al., 2015), positive Effekte auf die Stomataöffnung und Transpirationsrate (MUNEER et al., 2014; OGAWA, 1981a) sowie Erhöhungen der Nettophotosyntheserate, Stomatadichte und RuBisCo-Expression (MUNEER et al., 2014) zurückgeführt werden. Zugleich wurden bei einer Erhöhung des Blaulichtanteils (RANDALL und LOPEZ, 2015) und Sonnenlichtbedingungen, charakterisiert durch hohe Blaulichtanteile, dickere Stängel und eine Verringerung der Blattfläche festgestellt (ZHAO et al., 2012). Dies könnte die geringen Blatt:Frischmasse-Verhältnisse bei den LED-Varianten der Gewächshausversuche des Jahres 2014 im Vergleich zu den jeweiligen Kontrollen erklären (Tabelle 5.57).

Auch die Folienversuche deuten an, dass die Veränderungen der Biomassen vermutlich nicht einzig auf Modifikationen der Tageslichtsumme beruhen. In den Klimakammerversuchen führten Reduktionen der Tageslichtsummen durch die Folien um 28% (HMG72%) bzw. 43% (PL57%) bzw. 45% (HMG55%)

zu verhältnismäßig geringen Veränderungen der Frischmassen (+4% bzw. -18% bzw. -9%). Nur bei einer Reduktion der Tageslichtsumme um 60% (PL40%) wurde die Frischmasse um 57% verringert. Da es bei den erst genannten Varianten keine signifikanten Unterschiede der photosynthetisch wirksamen Pigmente im Vergleich zur Kontrolle gab (Tabelle 5.8, Anhang, Tabelle 12.4), kann davon ausgegangen werden, dass die Photosynthese auch bei geringeren Lichtintensitäten effizient funktionierte. Durch die verwendeten Folien wurde insbesondere das langwellige Grünlicht absorbiert, das weder wichtig für die Photosynthese ist, noch einen positiven Einfluss auf die Stomataöffnung und somit der CO₂-Aufnahme hat. Zugleich könnte die Reduktion des Grünlichtanteils eine positive Wirkung auf die photosynthetischen Vorgänge gehabt haben. Durch mehrere Studien wurde ein umkehrender Effekt grünen Lichtes auf die blaulichtinduzierte Stomataöffnung belegt (FRECHILLA et al., 2000; TALBOTT et al., 2002a).

Die Wirkung einer **roten** Zusatzbestrahlung auf das Pflanzenwachstum kann nicht eindeutig beschrieben werden. Während in den Versuchsreihen „GwH14“, „GwH14, nachts“ und „GwH14, 24h“ die Frisch-, Blatt- und Trockenmassen meist signifikant durch rote LEDs erhöht wurden, wurde das Blatt:Frishmasse-Verhältnis in den meisten Versuchsreihen („KK13“, „GwH14“, „GwH14, nachts“, „GwH14, 24h“) signifikant verringert. Gleiches galt für die Trockenmasse und den Trockenmassegehalt in der Versuchsreihe „GwH13“, während in den Klimakammerversuchen der Trockenmassegehalt durch rote LEDs signifikant erhöht wurde. Die Korrelationskoeffizienten waren dennoch häufig negativ. Dies könnte darauf begründet sein, dass rote LEDs meist zu geringeren Biomassen führten als blaue LEDs, aufgrund der leicht höheren Bestrahlungsstärke jedoch höhere Biomassen erwartet gewesen wären (Abbildung 5.43a). Durch die Berechnung der Rangkorrelationen wurde diese Diskrepanz verstärkt (Abbildung 5.43b).

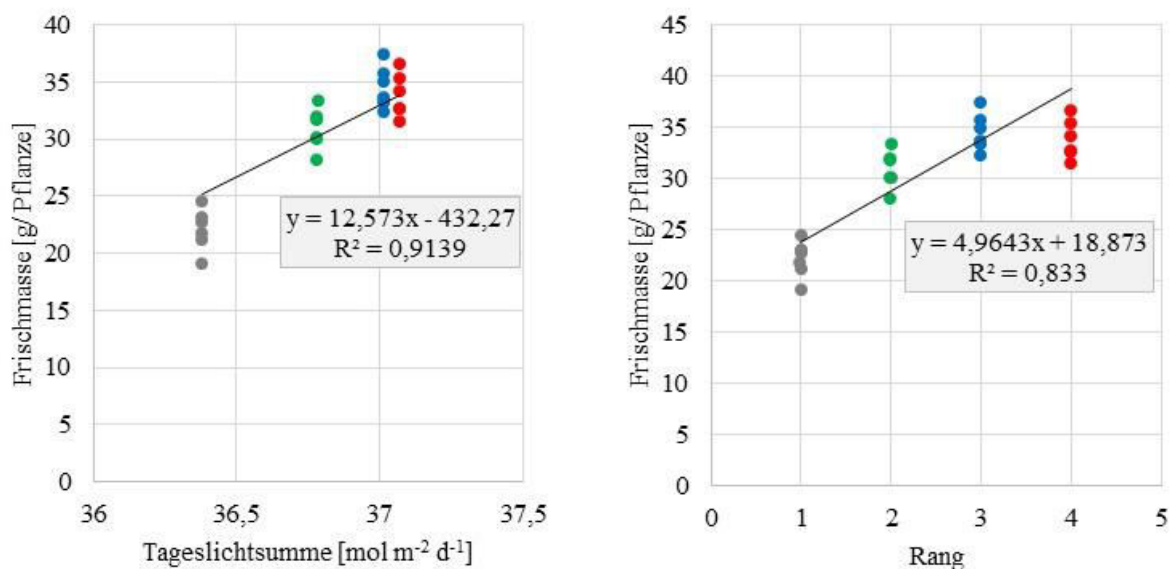


Abbildung 5.43 a,b: Zusammenhang der Frischmasse [g/ Pflanze] mit der Tageslichtsumme (links, a). Versuchsreihe „GwH14, 24h“. Dargestellte Varianten: grau= NL, grün= NL+G, blau= NL+B, rot= NL+R; Rechts: Zusammenhang der Frischmasse [g/ Pflanze] mit dem Rang bezüglich der Tageslichtsumme (b)

Abgesehen von den Korrelationsanalysen kann insgesamt für die meisten Versuchsreihen eine deutliche Erhöhung der Biomassen durch rote LEDs beschrieben werden. Die Wirkung war zwar etwas schwächer als bei einer Erhöhung des kurzwelligen Blaulichtanteils, jedoch wurden durch eine Erhöhung der Tageslichtsumme um 1% mit kurzwelligen Rotlicht die Frischmasse in den Gewächshausversuchen um durchschnittlich 9,9%, die Blattmasse um 6,2% und die Trockenmasse um 2,6% erhöht (Tabelle 6.1). Dies war auf Grundlage verschiedener Studien mit anderen Pflanzen erwartet gewesen (CEUNEN et al., 2012; LI et al., 2012a; MUNEER et al., 2014). Neben der Nutzung des Spektralbereichs für die photosynthetische Energiegewinnung (siehe Abschnitt 2.2.1) werden rotlichtinduzierte Förderungen der Stomataöffnung, Transpiration (OGAWA, 1981) und Chloroplastenbiogenese (YOO ET AL., 2019) beschrieben. Auch wenn andere LED-Varianten zu signifikant geringeren Blatt:Frischmasse-Verhältnissen im Vergleich zur Kontrolle in den Versuchsreihen „GwH14“, „GwH14, nachts“ und „GwH14, 24h“ führten, sind die stark reduzierten Blatt:Frischmasse-Verhältnisse in den Varianten FL+R („KK13“) und NL+R („GwH14“) im Vergleich zu den anderen LED-Varianten auffällig. Auch das vergleichsweise geringe Blatt:Frischmasse-Verhältnis in der Variante HMG72% („KK13“) deutet eine Beeinflussung durch den kurzwelligen Rotlichtanteil an, da die HMG-Folie eine hohe Durchlässigkeit für den kurzwelligen Rotlichtanteil aufweist (Tabelle 4.9). Eindeutig erklärt werden können diese Beobachtungen nicht. Jedoch wird durch ZHAO et al. (2012) beschrieben, dass direktes Sonnenlicht, charakterisiert durch einen hohen Rotlichtanteil, ein verstärktes Stängelwachstum und eine verringerte Blattfläche fördert. Daneben könnte die Gibberellinsäure als Bestandteil rotlichtinduzierter Signalkaskaden eine steuernde Funktion gehabt haben. Gibberellinsäure wird eine fördernde Wirkung auf das Stängelwachstum und eine umkehrende Wirkung auf die lichtinduzierte Stängelwachstumshemmung (KENDE und LANG, 1964; LOCKHART, 1956; XU et al., 1997) zugeschrieben und durch POTTER et al. (1999) mit einem verstärkten Stängelwachstum bei sinkenden Lichtintensitäten assoziiert. In verschiedenen Pflanzen konnte eine rotlichtinduzierte Synthese von Gibberellinsäure beobachtet werden (REID et al., 1968; TOYOMASU et al., 1993). Auch ist eine gibberellinsäureinduzierte Förderung der Lignifizierung (CHENG und MARSH, 1968) als Einflussfaktor des Blatt:Frischmasse-Verhältnisses denkbar. Ob über diesen Mechanismus nicht nur die Biomasseverteilung, sondern auch der Trockenmassegehalt beeinflusst wurde, ist nicht bekannt. In einigen Versuchsreihen wurde der Trockenmassegehalt jedoch negativ durch rote LEDs beeinflusst. Möglicherweise beruhte dies auf einer Reduktion des B:R-Verhältnisses, welches insgesamt positiv mit dem Trockenmassegehalt korrelierte (Tabelle 12.30) und auch bei anderen Pflanzen mit einer Beeinflussung des Trockenmassegehalts assoziiert wurde (DUTTA GUPTA und KARMAKAR, 2017).

Auch für die Frisch-, Blatt- und Trockenmassen liegen mehrheitlich positive Korrelationen mit dem **B:R-Verhältnis** vor (siehe Anhang, Tabelle 12.26, Tabelle 12.27, Tabelle 12.28). Die Wirkung des B:R-Verhältnisses war Gegenstand verschiedener Forschungsarbeiten. Bei *Ocimum basilicum* wurde die höchste Frischmasse bei einem R:B-Verhältnis von 0,7 (entspricht einem B:R-Verhältnis von 1,4) bestimmt, begründet unter anderem auf einer gesteigerten Assimilationsrate bei diesen Lichtbedingungen

(PIOVENE et al., 2015). Möglicherweise sind zudem auch synergistische Effekte bei der Stomataöffnung relevant, begründet auf einer Verstärkung der blaulichtinduzierten Stomataöffnung durch die rotlichtbedingte, photosynthetische CO₂-Fixierung im Mesophyll (SHIMAZAKI et al., 2007).

Neben der Beeinflussung durch die Blau- und Rotlichtanteile deuten sich durch die Versuche mit zusätzlichen grünen LEDs und die Korrelationskoeffizienten für das **R:FR-Verhältnis** eine biomassesteigernde Wirkung von zwei Lichtparametern an, die in der Literatur kontrovers diskutiert werden. Sowohl ein erhöhter Grünlichtanteil als auch ein reduziertes R:FR-Verhältnis sind charakteristisch für Schattenbedingungen und wurden bis vor einigen Jahren entsprechend mit Schattenvermeidungsreaktionen assoziiert. Mit Ausnahme der Klimakammerversuche stand das R:FR-Verhältnis in einem negativen Zusammenhang mit Frisch- (siehe Anhang, Tabelle 12.26), Blatt- (siehe Anhang, Tabelle 12.27) und Trockenmasse (siehe Anhang, Tabelle 12.29) sowie dem Trockenmassegehalt (siehe Anhang, Tabelle 12.30). Die Relevanz des fernroten Spektralbereichs für die Akkumulierung von Biomasse wurde für mehreren Pflanzen beschrieben (BAE et al., 2017; LEE et al., 2016), zurückgeführt auf eine steigende Absorption von Lichtenergie durch die vergrößerten Blattflächen bei einem höheren Fernrotanteil (KUBOTA et al., 2012; LI und KUBOTA, 2009; STUEFER und HUBER, 1998). Dies könnte erklären, warum die Korrelationen zwischen Blattmasse und R:FR-Verhältnis (siehe Anhang, Tabelle 12.27) stärker waren als zwischen Frischmasse und R:FR-Verhältnis (siehe Anhang, Tabelle 12.26). Eine weitere Erklärung, insbesondere für höhere Frischmassen bei geringeren R:FR-Verhältnissen, könnte die veränderte Photosynthatverteilung sein. KASPERBAUER et al. (1984) zeigten bei Sojapflanzen durch eine Bestrahlung mit fernrotem Licht am Ende der Photoperiode höhere Stammtrockenmassen und geringere Wurzeltrockenmassen als bei einer Bestrahlung mit rotem Licht. Mit PAR1 und PAR2 wurden zudem negative Regulatoren des Schattenvermeidungssyndroms identifiziert (HAO et al., 2012; ROIG-VILLANOVA et al., 2007, 2006), deren Expression bei sinkenden R:FR-Verhältnissen steigt (ROIG-VILLANOVA et al., 2007, 2006) und die transkriptional die Akkumulation von Auxin unterdrücken (HALLIDAY et al., 2009; ROIG-VILLANOVA et al., 2007). Als weitere negative Regulatoren des Schattenvermeidungssyndroms wurden HFR1 (HORNITSCHKE et al., 2009; WANG et al., 2015) und PIL1 (=PHYTOCHROME INTERACTING FACTOR 3-LIKE1) (HORNITSCHKE et al., 2009) identifiziert, die ebenfalls bei geringen R:FR-Verhältnissen die Reaktionen der Pflanzen auf verringerte Bestrahlungsstärken reduzieren. Die Kontroverse bezüglich der Wirkung des R:FR-Verhältnisses kann vielleicht auch dadurch erklärt werden, dass eine Verringerung des Verhältnisses bei verschiedenen Situationen gemessen werden kann. Eine Reduktion gibt es nicht nur unter Schattenbedingungen (Abbildung 2.9), assoziiert mit Schattenvermeidungsreaktionen, sondern auch im Frühling (Abbildung 2.5) (GÓRSKI, 1980, 1976) und wird dann mit dem jahreszeitlichen Photoperiodismus in Zusammenhang gebracht.

Auch die Wirkung des **grünen** Spektralbereichs auf die Biomassebildung wird kontrovers diskutiert. Grünem Licht wird eine reduzierende Wirkung auf die blaulichtinduzierte Stomataöffnung nachgesagt (FRECHILLA et al., 2000; TALBOTT et al., 2002a) sowie mit einer geringeren Absorption durch photo-

synthetisch aktive Pigmente (Abbildung 2.14) assoziiert. Dennoch zeigte grünes Licht in einigen Studien eine positive Wirkung auf die Frischmasse der Pflanzen (KIM et al., 2004a; LIN et al., 2013) bzw. Ernteerträge (LU et al., 2012). Auch in der vorliegenden Arbeit wurde die Frisch- und Blattmasse durch zusätzliche grüne LEDs in den Versuchsreihen „GwH14“ und „GwH14, 24h“ erhöht, meist signifikant. Durchschnittlich wurde in den Gewächshausversuchen bei einer Erhöhung der Tageslichtsumme um 1% durch Supplementierung mit kurzwelligem Grünlicht die Frischmasse um 8,3% gesteigert (Tabelle 6.1). In einigen Versuchsreihen war die Wirkung der grünen LEDs unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Bestrahlungsstärken sogar höher als bei roten („GwH14“, „GwH14, 24h“) und blauen LEDs („GwH14, 24h“). Anders als eine Reduktion des R:FR-Verhältnisses wird für kurzwelliges Grünlicht eine Verringerung der HFR1- und PIL1-Akkumulation beschrieben, möglicherweise begründet auf einer Aktivierung der Phytochrome, die die HFR1- und PIL1-Akkumulation unterdrücken (WANG et al., 2015), weswegen der frischmassesteigernde Effekt von grünem Licht vermutlich auf anderen Mechanismen beruht. LIU et al. (2017) führten gesteigerte Biomassen durch kurzwelliges Grünlicht auf höhere Gehalte an Photosynthesepigmenten sowie einer Erhöhung von CO₂-Assimilation, der stomatären Leitfähigkeit, intrazellulären CO₂-Konzentration und Transpiration zurück. Die geringere Absorptionsrate durch Photosynthesepigmente der oberen Zellschichten (TERASHIMA et al., 2009) bzw. oberliegender Blätter (KIM et al., 2004b) wird mit einer photosynthesesteigernden Wirkung bei einer zusätzlichen Bestrahlung mit Grünlicht assoziiert (KIM et al., 2004b; LU et al., 2012; TERASHIMA et al., 2009), das in tiefergelegenden Blattschichten den größten Anteil des absorbierten Lichtes ausmacht (EVANS, 1999) und eine höhere photosynthetische Quantenausbeute hat als Rotlicht (TERASHIMA et al., 2009), resultierend in einer höheren CO₂-Fixierung (NISHIO, 2000; SUN et al., 1998) und Biomassebildung (KIM et al., 2004b). Möglicherweise können diese Aspekte auch die mitunter höheren Trockenmassen bzw. Trockenmassegehalte bei der Bestrahlung mit grünen LEDs erklären, die in Übereinstimmung stehen mit den Ergebnissen anderer Studien mit anderen Spezies (KIM et al., 2004a; LIU et al., 2017; YORIO et al., 2001).

Auffällig war, dass eine Supplementierung mit kurzwelligem Grünlicht eine stärkere Wirkung bei geringen Tageslichtsummen der Grundbelichtung hatte. Während in der Versuchsreihe „GwH13“ mit der höchsten mittleren Tageslichtsumme eine Reduktion der Frischmasse durch eine zusätzliche Bestrahlung mit grünen LEDs verzeichnet wurde (-13,6%), kam es in den Versuchsreihen des Jahres 2014 mit geringeren mittleren Tageslichtsummen zu Steigerungen (+13,2 bis +39,7%). Auch in der Klimakammer wurde eine Steigerung von +10% bestimmt. Möglicherweise spielt grünes Licht vor allem bei geringen Bestrahlungsstärken, auch unter Schattenbedingungen, eine wichtige Rolle, wenn die Photonenmengen der blauen und roten Spektralbereiche nicht ausreichen, um das Maximum der Photosynthese zu erreichen. Die mitunter schwächere Wirkung des kurzwelligen Grünlichts auf die Biomasseakkumulation im Vergleich zum Blau- und Rotlicht könnte darauf begründet sein, dass das kurzwellige Grünlicht vorwiegend durch Carotinoide absorbiert wird (Abbildung 2.14). Die Weiterleitung der Anre-

gungsenergie von Carotinoiden auf Chlorophylle hat jedoch eine geringere Effizienz als zwischen Chlorophyllmolekülen, sodass die photosynthetische Aktivität in diesem Bereich zurückgeht (LAISK et al., 2014).

Insgesamt waren die unterschiedlichen Reaktionen auf die LEDs in den verschiedenen Versuchsreihen auffällig. Während im Versuchsjahr 2014 blaue LED mit Bestrahlungsstärken von $11 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ zu Frischmassesteigerungen von 30-65% führten, bewirkten die gleichen LEDs in der Versuchsreihe „GwH13“ nur leichte Frischmassesteigerungen von durchschnittlich 4%. Möglicherweise kann die jeweilige prozentuale Erhöhung der Tageslichtsumme durch die LEDs in den einzelnen Versuchsreihen relevant gewesen sein. Bezogen auf die durchschnittliche Tageslichtsumme erhöhten blaue LEDs die Lichtmenge in der Versuchsreihe „GwH14, nachts“ um 6,83%, in der Versuchsreihe „GwH13“ hingegen nur um 1,52%. Möglicherweise wurde zudem in der Versuchsreihe „GwH13“ häufiger der Lichtsättigungspunkt erreicht, sodass eine weitere Erhöhung der Bestrahlungsstärke, insbesondere am Mittag, keinen Anstieg der Photosyntheserate bewirkte (RIBEIRO et al., 2006). Eine abnehmende Wirkung einer Erhöhung der Lichtintensität auf die Frischmasseakkumulation bei hohen Ausgangs-Lichtintensitäten wurde beschrieben (MARCELIS et al., 2006). Auch HERNÁNDEZ und KUBOTA (2014) deuten darauf hin, dass eine Supplementierung mit LEDs zu unterschiedlichen Effekten in Abhängigkeit von der Lichtintensität der Grundbelichtung führen können. Und COPE und BUGBEE (2013) zeigten in ihrer Studie, dass die Beeinflussung der Trockenmasse durch die spektrale Lichtzusammensetzung auch von der Lichtintensität und der Pflanzenspezies abhängt und beispielsweise der Einfluss des Blaulichtanteils bei steigenden Lichtintensitäten abnimmt. Zudem kann eine Rolle gespielt haben, dass in den Versuchsreihen „GwH14, nachts“ und „GwH14, 24h“ die Bestrahlung (auch) während der Nacht stattgefunden hat. Möglicherweise können die hohen Frischmassesteigerungen von 46,9% bzw. 53,0% durch blaue LEDs in den beiden Versuchsreihen damit erklärt werden, dass bereits PAR-Werte über $1 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ für phototropinvermittelte, blaulichtinduzierte Stomataöffnungen ausreichen (KINOSHITA et al., 2001), während die Stomata normalerweise bei Nacht geschlossen sind (CHEN et al., 2012). Auch der rote Spektralbereich führt, phytochromevermittelt, zu einer Öffnung der Stomata (WANG et al., 2010), wobei die Wirkung weniger stark ist als vom blauen Spektralbereich (KINOSHITA et al., 2001; SHIMAZAKI et al., 2007) und vermutlich auch weiter abgeschwächt wurde, da die Emissionsspektren der roten LEDs nicht im Absorptionsmaximum der Phytochrome lagen (Abbildung 2.15, Abbildung 4.14).

Insgesamt kann eine starke Abhängigkeit der Biomasseakkumulation von *P. odorata* von der Tageslichtsumme beobachtet werden. Deutlich stärker wirkte jedoch eine Steigerung der Tageslichtsumme, wenn nur bestimmte Spektralbereiche verstärkt wurden. Dabei ist vermutlich nicht nur die Bereitstellung photosynthetisch nutzbarer Strahlung relevant, sondern auch eine Förderung von Prozessen, die die Biomassebildung unterstützen. Abhängig von den Lichtbedingungen wird die Biomassebildung auch durch die Temperatur beeinflusst. Daneben zeigen die Ergebnisse das Potential einer zusätzlichen Bestrahlung mit LEDs, während strahlungsschwachen Monaten oder temperaturbedingte Biomasse-massereduktionen zu kompensieren.

6. GENERELLE DISKUSSION

In Abschnitt 5 wurde die Beeinflussung der einzelnen Inhaltsstoffe und Wachstumsparameter durch die Lichtmodifizierungen betrachtet. Jedoch war das Ziel der Arbeit nicht, einzelne Inhaltsstoffgehalte durch die Lichtbedingungen zu erhöhen, sondern den Einfluss des Lichtes auf den gesamten Nährwert bzw. die nutritive Qualität der Pflanzen zu untersuchen. Zu diesem Zweck werden im folgenden Abschnitt die Ergebnisse zusammengeführt. Unter Berücksichtigung weiterer Einflussfaktoren werden allgemeine Tendenzen im Hinblick auf die Beeinflussung des Nährwertes und Ertrags durch Lichtintensität und –spektrum dargestellt.

Entscheidend für die Bearbeitung des Themas ist eine differenzierte Betrachtung des Einflusses der Lichtintensität und der spektralen Lichtzusammensetzung. Diesbezüglich deuten die partiellen Korrelationskoeffizienten Tendenzen an, jedoch werden die Wirkungen nur bezüglich ihrer Signifikanz bewertet. Eine quantitative Bewertung der Ertrags- oder Nährwertsteigerungen ist anhand der Korrelations- und Varianzanalysen nicht möglich, ebenso wie eine Gewichtung im Hinblick auf die Effizienz der entsprechenden Lichtmodifikationen. Bei mehreren positiven Korrelationen ist folglich keine Aussage möglich, durch welche Lichteigenschaften der jeweilige Parameter am stärksten beeinflusst wird. Für einen besseren Vergleich der Wirkungen wurden deswegen die Inhaltsstoff- bzw. Biomassesteigerungen berechnet, die bei einer spektralbereichsneutralen Erhöhung der Tageslichtsumme um 1% (bedingt durch unterschiedliche Bestrahlungsstärken der Grundbelichtung) oder einer spektralbereichsabhängigen Erhöhung der Tageslichtsumme um 1% (durch zusätzliche LEDs) erreicht wurden. Dadurch werden die unterschiedlichen Bestrahlungsstärken der LEDs heraus gerechnet und es werden die differenzierten Einflüsse der Tageslichtsumme und der spektralen Lichtzusammensetzung deutlich.

Obleich teilweise lineare Zusammenhänge zwischen einzelnen Inhaltsstoffen und der Tageslichtsumme in der Klimakammer bestanden und sich diese mitunter auch in den partiellen Korrelationen widerspiegeln, waren die Reaktionen der organischen Inhaltsstoffe auf eine spektralbereichsneutrale Erhöhung der Tageslichtsumme gering (Tabelle 6.1). Deutliche Veränderungen des Nährwertes wurden hingegen durch eine Verstärkung bestimmter Spektralbereiche erreicht, wobei die einzelnen Spektralbereiche zu unterschiedlichen Reaktionen führten. Diesbezüglich bewirkte der kurzwellige Grünlichtanteil die stärkste Nährwerterhöhung durch deutliche Steigerungen der Polyphenol-, Flavonoid- und Carotinoidgehalte sowie der antioxidativen Kapazität, während die kurzwelligen Blau- und Rotlichtanteile den Nährwert nicht bzw. tendenziell negativ beeinflussten. Im Hinblick auf die anorganischen Inhaltsstoffe sind aus ernährungsphysiologischer Sicht Reduktionen der Nitrat- und ggf. der Phosphorgehalte und Steigerungen der anderen untersuchten Mineralstoffgehalte erwünscht. Spektralbereichsneutrale Erhöhungen der Tageslichtsumme hatten auch diesbezüglich kaum eine Wirkung. Hingegen

fürten alle betrachteten, spektralbereichsabhängigen Erhöhungen der Tageslichtsummen zu einer besseren nutritiven Qualität im Hinblick auf die anorganischen Inhaltsstoffe.

Ähnlich verhielt es sich mit dem Pflanzenwachstum. Dieses wurde, im Gegensatz zu den Inhaltsstoffen, insgesamt positiv durch eine spektralbereichsneutrale Erhöhung der Tageslichtsumme beeinflusst. Jedoch bewirkte auch hier eine Verstärkung bestimmter Spektralbereiche eine deutlich stärkere Förderung des Pflanzenwachstums. Der stärkste Effekt wurde durch das kurzwellige Grünlicht erreicht.

Tabelle 6.1: Durchschnittliche Veränderungen von Inhaltsstoffen und Wachstumsparametern/ Biomassen [%] in der Klimakammer durch Erhöhungen der Tageslichtsumme um 1% (bezogen auf das gesamte Lichtspektrum oder Verstärkung bestimmter Spektralbereiche)

	Erhöhung der Tageslichtsumme um 1% durch Steigerung des...			
	gesamten Lichtspektrums	kurzwelligen Blaulichtanteils (443 nm)	kurzwelligen Grünlichtanteils (515 nm)	kurzwelligen Rotlichtanteils (629 nm)
Veränderungen der Inhaltsstoffgehalte [%]				
Ascorbinsäure	-0,1	+19,7	-24,6	-1,9
Carotinoide	0,0	-3,7	+5,0	-13,7
Polyphenole	-0,1	+1,9	+26,2	+2,8
Antioxidative Kapazität	-0,2	-31,1	+16,9	-10,2
Flavonoide	+0,3	-17,6	+7,6	-6,3
Nitrat	+0,2	-11,2	-18,0	-39,4
Phosphor	-0,1	-1,6	-2,3	-22,5
Kalium	+0,1	-0,3	-2,6	-12,4
Magnesium	+0,1	+2,9	+23,0	+5,8
Calcium	-0,1	+3,5	+11,9	+5,7
Eisen	-0,1	+3,1	-4,1	+6,0
Veränderungen der Wachstumsparameter				
Frischmasse	+0,4	+8,9	+11,1	+11,2
Blattmasse	+0,3	+11,7	+18,7	+7,2
Trockenmasse	+0,4	+20,1	+31,6	+14,2
Blatt:Frischmasse	0,0	+0,6	+2,4	-9,3
Trockenmassegehalt	+0,1	+5,9	+9,2	+4,4
Trieblänge	-0,1	+14,0	-6,0	-18,8

Die Beobachtungen im Gewächshaus (Tabelle 6.2) zeigten große Unterschiede zu den Klimakammerversuchen. Die Inhaltsstoffe reagierten sehr unterschiedlich auf die Lichtbedingungen. Sowohl Veränderungen der Tageslichtsummen als auch der spektralen Lichtzusammensetzung zeigten deutliche Wirkungen. Die stärksten Reaktionen wurden bei der Ascorbinsäure, Anthocyanen, Nitrat und Eisen beobachtet. Auffällig ist, dass die Gehalte an Ascorbinsäure und Anthocyanen gesunken sind, wenn die Lichtintensität ohne Veränderungen der spektralen Lichtzusammensetzung erhöht wurde. Eine Erhöhung der Tageslichtsumme durch Verstärkung bestimmter Spektralbereiche führte hingegen zu einer Steigerung der Gehalte. Anders war dies bei den Polyphenolen, deren Gehalt bei einer spektralbereichsneutralen Erhöhung der Tageslichtsumme gesteigert wurde, bei einer Verstärkung bestimmter Spektralbereiche hingegen verringert. Bei den Mineralstoffen ist in den Gewächshausversuchen keine Aussage im Hinblick auf den Einfluss einer spektralbereichsneutralen Erhöhung der Tageslichtsumme möglich.

Die Ergebnisse einer Verstärkung einzelner Spektralbereiche deuten jedoch an, dass einzelne Spektralbereiche eine spezifische Wirkung hatten, wobei die Effekte von Verstärkungen der kurzwelligen Grün- und Rotlichtanteile tendenziell ähnlich waren. Insgesamt wurden die Mineralstoffgehalte am stärksten durch den kurzwelligen Rotlichtanteil (629 nm) erhöht, bei gleichzeitiger Reduktion des Nitratgehalts. Unter Berücksichtigung aller Inhaltsstoffe zeigte der kurzwellige Grünlichtanteil die stärkste Nährwertverbesserung.

Die Wachstumsparameter reagierten durchweg positiv auf eine spektralbereichsneutrale Erhöhung der Tageslichtsumme. Eine Verstärkung bestimmter Spektralbereiche steigerte den Effekt. Alle Wachstumsparameter betrachtet, entwickelten sich die Pflanzen am besten bei einer Verstärkung des kurzwelligen Blaulichtanteils.

Tabelle 6.2: Durchschnittliche Veränderungen von Inhaltsstoffen und Wachstumsparametern/ Biomassen [%] im Gewächshaus durch Erhöhungen der Tageslichtsumme um 1% (bezogen auf das gesamte Lichtspektrum oder Verstärkung bestimmter Spektralbereiche)

	Erhöhung der Tageslichtsumme um 1% durch Steigerung des...			
	gesamten Lichtspektrums	kurzwelligen Blaulichtanteils (443 nm)	kurzwelligen Grünlichtanteils (515 nm)	kurzwelligen Rotlichtanteils (629 nm)
Veränderungen der Inhaltsstoffgehalte [%]				
Ascorbinsäure	0,0	+4,9	+19,4	+8,4
Carotinoide	0,0	+2,7	+2,4	-1,3
Polyphenole	+0,3	-3,6	-13,0	-5,2
Antioxidative Kapazität	+0,1	+1,4	+1,3	+3,6
Flavonoide	+0,1	0,0	+0,8	+0,8
Anthocyane	-0,2	+2,7	+46,0	+16,0
Nitrat	./.*	+29,2	-30,9	-12,3
Phosphor	./.*	-0,2	-3,9	+0,6
Kalium	./.*	+4,7	+4,3	+5,6
Magnesium	./.*	-6,6	-13,5	-7,1
Calcium	./.*	-6,3	-6,4	-3,8
Eisen	./.*	+5,5	+17,2	+20,0
Veränderungen der Wachstumsparameter [%]				
Frischmasse	+0,7	+13,0	+8,3	+9,9
Blattmasse	+1,3	+8,5	+0,8	+6,2
Trockenmasse	+1,4	+7,4	-3,7	+2,6
Blatt:Frischmasse	+0,1	-2,9	-5,4	-2,4
Trockenmassegehalt	0,0	-1,2	-2,7	-3,3
Trieblänge	+0,1	+9,3	+16,3	+9,9

* Berechnung aufgrund fehlender Werte nicht möglich

Die unterschiedliche Beeinflussung einiger Inhaltsstoffe durch spektralbereichsneutrale und spektralbereichsabhängige Erhöhungen der Tageslichtsummen lässt darauf schließen, dass auch Bereiche des Lichtspektrums die Ergebnisse beeinflusst haben, die nicht durch die verwendeten LEDs verstärkt wurden. Denkbar sind Einflüsse der langwelligen Grün- und Rotlichtanteile. Hinweise liefern die Versuche mit photoselktiven Folien, die sich untereinander durch unterschiedliche Beeinflussungen des B:R-Verhältnisses sowie der Durchlässigkeit für den grünen Spektralbereich differenzieren. Unter Berücksichtigung der simultan verlaufenden Reduktionen der Tageslichtsummen wurde der Nährwert durch

das Lichtspektrum unter der PL-Folie (charakterisiert durch ein hohes B:R- und BR:G-Verhältnis und eine stärkere Absorption des langwelligen Grünlichtanteils) verbessert. Die HMG-Folie förderte hingegen in der Klimakammer stärker das Pflanzenwachstum, welches im Gewächshaus durch beide Folien ähnlich beeinflusst wurde. Dies wurde auch bei *Perilla frutescens* beobachtet. Eine Überdeckung mit der PL-Folie beeinträchtigte, trotz deutlich reduzierter Bestrahlungsstärke, die Inhaltsstoffakkumulierung nicht negativ. Hingegen führte eine Überdeckung der Pflanzen mit der HMG-Folie zu einer signifikanten Reduktion der Polyphenol- und Anthocyangehalte sowie der antioxidativen Kapazität. Die Frischmasse wurde bei *Perilla frutescens* hingegen weniger durch Überdeckungen mit der HMG-Folie reduziert (GRBIC et al., 2016). Daraus kann eine positive Beeinflussung des Nährwertes durch ein höheres B:R-Verhältnis und/ oder einen reduzierten Anteil an langwelligen Grünlicht abgeleitet werden. Das Pflanzenwachstum wurde vermutlich positiv durch eine Erhöhung des BR:G-Verhältnisses beeinflusst mit einer starken Wirkung eines höheren Rotlichtanteils in der Klimakammer. Bestätigt werden diese Beobachtungen durch die partiellen Korrelationskoeffizienten, die für mehrere Versuchsreihen positive Zusammenhänge zwischen dem BR:G-Verhältnis und den Frisch-, Blatt- und Trockenmassen darstellen. Dies wird auch durch die Hauptkomponentenanalysen (Abbildung 6.1 und 6.2) angedeutet.

Möglicherweise kann die Wirkung einer Verstärkung bestimmter Spektralbereiche dadurch erklärt werden, dass die verstärkten Spektralbereiche teilweise im Absorptionsspektrum bestimmter Photorezeptoren lagen und es folglich zu einer höheren Induktion entsprechender Signalkaskaden kam (siehe Abschnitt 2.2.2.1). Ferner entfiel bei einer spektralbereichsneutralen Erhöhung der Tageslichtsumme ein Teil der Lichtenergie auf Spektralbereiche, die nicht oder kaum durch Photorezeptoren und Photosynthesepigmente absorbiert werden. Die entsprechende Energie wird ungenutzt transmittiert oder reflektiert, wodurch die Effizienz der Bestrahlungssteigerung reduziert wird. Weiterhin wurden auch Spektralbereiche verstärkt, die möglicherweise den Aufbau von Biomasse und die Inhaltsstoffsynthese hemmen. Aus den Ergebnissen der Folierversuche ergibt sich eine mutmaßlich negative Wirkung des langwelligen Grünlichtanteils auf den Nährwert und den Aufbau von Biomasse. Dessen hemmender Effekt auf die Cryptochrome wurde bereits vielfach beschrieben (BOULY et al., 2007; SELLARO et al., 2010).

Unabhängig von der Tageslichtsumme werden durch eine Clusteranalyse, durchgeführt als Hauptkomponentenanalyse, die Untersuchungsparameter zusammengefasst, die ähnlich auf die Lichtmodifikationen reagierten. Diese Methode dient dazu zu erkennen, welche Parameter bei einer Lichtmodifizierung parallel verändert werden können, bzw. bei welchen Parametern eine simultane Steigerung durch eine der betrachteten Lichtmodifikationen nicht möglich ist.

Anhand der Hauptkomponentenanalyse der Klimakammerversuche können drei Cluster identifiziert werden. In einem sind die meisten Wachstumsparameter zusammengefasst. Ferner reagierten mehrere anorganische Inhaltsstoffe ähnlich, unter diesen mit Kalium und Nitrat zwei Substanzen, die teilweise mit gleichen Funktionen in der Pflanze assoziiert werden. Erhöhungen des Kaliumgehalts, assoziiert mit gesundheitsfördernden Eigenschaften, geht folglich einher mit einer Erhöhung des Nitratgehalts, die aus Sicht der Humanernährung nicht gewünscht ist. In einem dritten Cluster finden sich Polyphenole,

Flavonoide und die antioxidative Kapazität. Auffällig ist, dass Wachstumsparameter und Inhaltsstoffgehalte unterschiedlichen Clustern zugeordnet sind. Folglich sind unter den gegebenen Bedingungen in der Klimakammer für eine Nährwertsteigerung andere Lichtbedingungen relevant als für eine Förderung des Pflanzenwachstums. Dies wird auch ersichtlich, wenn die Cluster bestimmten Lichteigenschaften zugeordnet werden. Das Cluster mit verschiedenen Wachstumsparametern kann mit einem Einfluss des Blaulichtanteils assoziiert werden, das Cluster mit den anorganischen Substanzen Nitrat, Kalium und Phosphor mit Veränderungen des Rotlichtanteils. Die meisten Inhaltsstoffe sind jedoch in einem Cluster zusammengefasst, dass mit dem Grünlichtanteil assoziiert werden kann. Aus diesen Zuordnungen können die Hauptkomponenten abgeleitet werden. Diese beziehen sich vermutlich auf das B:R-Verhältnis (Komponente 1) und das B:G-Verhältnis (Komponente 2).

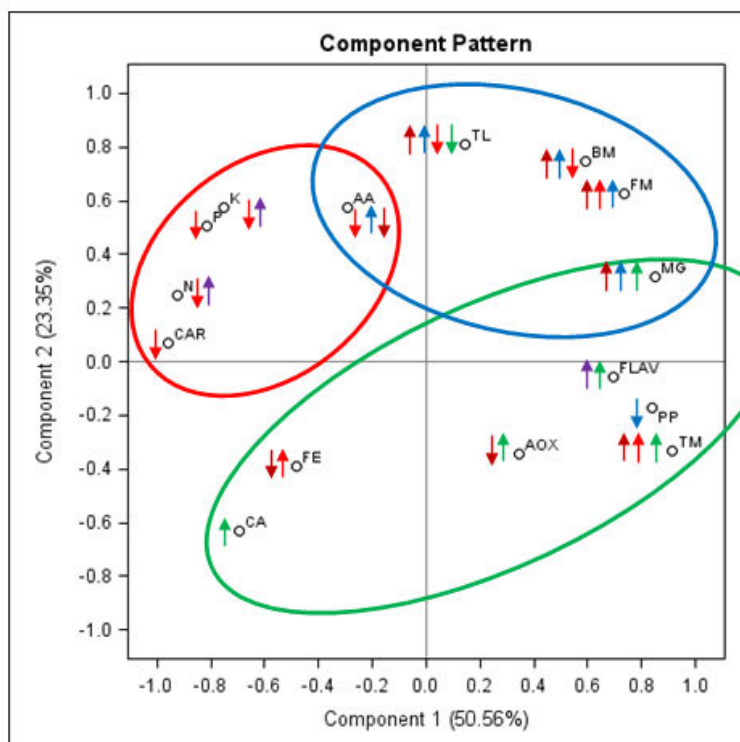


Abbildung 6.1: Hauptkomponentenanalyse mit den Ergebnissen aus den Klimakammerversuchen: TL (=Trieblänge), FM (=Frischmasse), BM (=Blattmasse), TM (=Trockenmasse), TM_ (=Trockenmassegehalt), BMFM (=Blatt:Frischmasse), AA (=Ascorbinsäure), CAR (=Carotinoide), PP (=Polyphenole), AOX (=Antioxidative Kapazität), FLAV (=Flavonoide), CA (=Calcium), FE (=Eisen), K (=Kalium), MG (=Magnesium), P (=Phosphor), N (=Nitrat); um den Einfluss des PAR-Wertes herauszurechnen, beziehen sich die Gehalte/ Wachstumsparameter der LED-/Folienvarianten auf die zugehörige Kontrolle [%]. Pfeile deuten die Beeinflussung (positiv bzw. negativ) der einzelnen Untersuchungsparameter durch die spektrale Lichtzusammensetzung an: blau (blaue LEDs/ kurzwelliger Blaulichtanteil); grün (grüne LEDs/ kurzwelliger Grünlichtanteil); rot (rote LEDs/ kurzwelliger Rotlichtanteil); ↑ Beeinflussung durch HMG; ↑ Beeinflussung durch PL

Ähnlich wie bei den Versuchen in der Klimakammer bilden auch bei den einzelnen Versuchsreihen im Gewächshaus (Abbildung 6.2) jeweils mehrere Wachstumsparameter Cluster. In folgenden Untersuchungen könnte deswegen die Anzahl der betrachteten Wachstumsparameter reduziert werden. Im Hinblick auf die Inhaltsstoffe gibt es hingegen kaum Gemeinsamkeiten mit den Versuchen in der Klimakammer, jedoch auch nicht zwischen den Gewächshausversuchen. Die anorganischen Substanzen, die auch in der Klimakammer ein Cluster bildeten (Nitrat, Phosphor, Kalium) wurden auch im Gewächshaus („GwH13“) ähnlich durch die Lichtbedingungen beeinflusst. Ferner konnten Ascorbinsäure und Anthocyane, teilweise auch Carotinoide, zu einem Cluster zusammengefasst werden. Dabei fällt erneut

auf, dass zumindest für die Versuchsreihen „GwH13“ und „GwH14, nachts“ die Biomassen einem anderen Cluster zugeordnet sind als die meisten Inhaltsstoffe. Folglich wurden auch unter diesen Bedingungen Biomassen und Nährwerte unterschiedlich durch die Lichtbedingungen beeinflusst. Dies gilt jedoch nicht für die Versuchsreihen „GwH14“ und „GwH14, 24h“, in denen folglich Biomasse und Nährwert durch die gleichen Lichtbedingungen gefördert wurden.

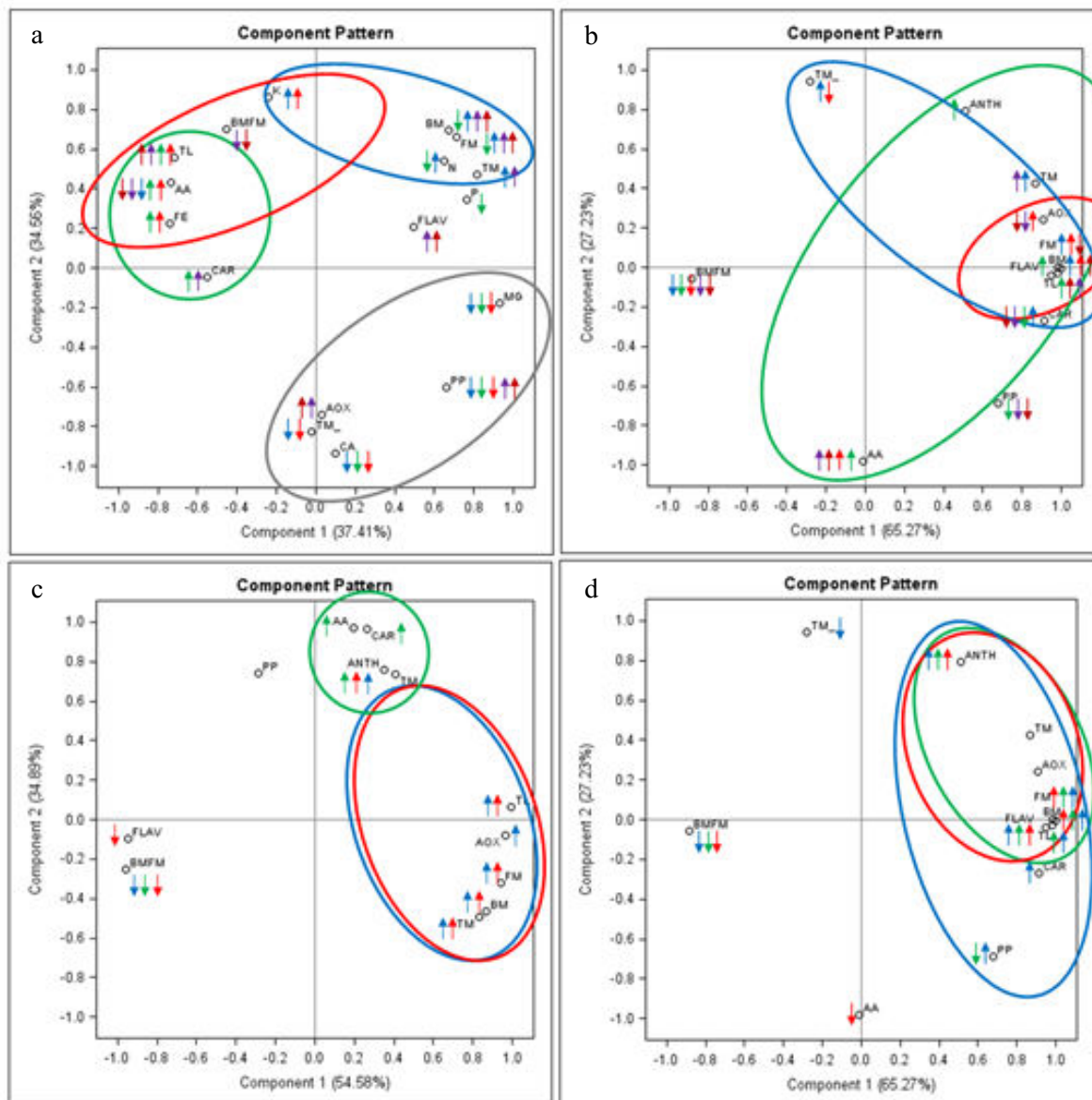


Abbildung 6.2: Hauptkomponentenanalysen: „GwH13“ (a), „GwH14“ (b), „GwH14, nachts“ (c), „GwH14, 24h“ (d); TL (=Trieblänge), FM (=Frischmasse), BM (=Blattmasse), TM (=Trockenmasse), TM_ (=Trockenmassegehalt), BMFM (=Blatt:Frischmasse), AA (=Ascorbinsäure), CAR (=Carotinoide), PP (=Polyphenole), AOX (=antioxidative Kapazität), FLAV (=Flavonoide), CA (=Calcium), FE (=Eisen), K (=Kalium), MG (=Magnesium), P (=Phosphor), N (=Nitrat); Pfeile deuten die Beeinflussung (positiv bzw. negativ) der einzelnen Untersuchungsparameter durch die spektrale Lichtzusammensetzung an: blau (blaue LEDs/ kurzwelliger Blaulichtanteil); grün (grüne LEDs/ kurzwelliger Grünlichtanteil); rot (rote LEDs/ kurzwelliger Rotlichtanteil); ↑ Beeinflussung durch HMG; ↑ Beeinflussung durch PL (eine größere Ansicht der Hauptkomponentenanalysen finden sich im Anhang 7)

Weiterhin können die Cluster einzelnen Lichteigenschaften zugeordnet werden. Dabei kann in den Versuchsreihen „GwH14, nachts“ und „GwH14, 24h“ jeweils ein Cluster mit dem blauen und roten Spektralbereich assoziiert werden. Daraus kann abgeleitet werden, dass bei einer nächtlichen Bestrahlung beide Spektralbereiche den gleichen Effekt erzielten. Bei einer Modifizierung des Tageslichtes war die Wirkung der Spektralbereiche, wie auch bei den Klimakammerversuchen (Abbildung 6.1), hingegen differenzierter. Folglich ist bei einer Modifizierung des Tageslichtes die Auswahl einer Zusatzbestrahlung relevanter. Anhand der Zuordnung der Cluster zu bestimmten Lichteigenschaften können die Hauptkomponenten beschrieben werden. Mehrere Hauptkomponenten können durch die BR:G- und BRG:PAR-Verhältnisse erklärt werden (den Anteil, den die, durch LEDs verstärkten Spektralbereiche, an der gesamten Verstärkung des PAR-Bereichs ausmachen). Dadurch wird erneut der Einfluss von Spektralbereichen deutlich, die bei den Versuchen mit monochromatischen LEDs nicht berücksichtigt wurden, vermutlich des langwelligen Grünlichtanteils.

Aufgrund der insgesamt sehr unterschiedlichen Wirkungen der Lichtmodifikationen in den verschiedenen Versuchsreihen wird deutlich, dass die Reaktionen vermutlich auch von weiteren Faktoren abhängen. Dazu gehört sicherlich die Temperatur, deren Einfluss durch multiple Korrelationen belegt wurde (siehe Anhang, Tabelle 12.24, Tabelle 12.25), jedoch auch das Lichtspektrum der Grundbelichtung und mögliche Schwankungen der Wachstumsbedingungen. LEDs und Folien veränderten die künstliche Belichtung mit Dreiband-Leuchtstoffröhren in der Klimakammer anders als das Breitbandspektrum der Sonne. Die photoselktiven Folien zeigten eine starke Absorption im mittel- und längerwelligen Grünlichtbereich und eine hohe Transparenz im längerwelligen Rotlichtbereich, wodurch die Reduktion der Bestrahlungsstärke in der Klimakammer deutlich stärker ausfiel als im Gewächshaus. Die LEDs ergänzten in der Klimakammer das Dreiband-Emissionsspektrums der Leuchtstofflampen mitunter in Bereichen, die durch die Grundbelichtung nicht oder kaum abgedeckt wurden. Insbesondere die grünen LEDs emittierten in einem Bereich, der durch die Leuchtstoffröhren kaum bedient wurde.

Unter Berücksichtigung aller statistischen Auswertungen kann abgeleitet werden, dass eine allgemeingültige Verbesserung aller untersuchten Parameter durch eine durchgeführte Lichtmodifikation nicht erreicht werden kann. Deutlich wird dies anhand der anorganischen Inhaltsstoffe Nitrat und Kalium, die ähnlich durch die Lichtbedingungen beeinflusst wurden, jedoch ernährungsphysiologisch sehr unterschiedlich bewertet werden. Aufgrund unterschiedlicher Wachstumsbedingungen lassen sich Ergebnisse zudem nicht auf andere Situationen übertragen. Dies gilt sowohl für verschiedene Versuchsstandorte (Gewächshaus, Klimakammer) als auch für unterschiedliche Versuchsmonate. Dennoch zeigen die Ergebnisse, dass Verstärkungen mit bestimmten Spektralbereichen zu besseren Ergebnissen im Hinblick auf Verbesserungen des Nährwertes und Ertragssteigerungen führen als eine spektralbereichsneutrale Erhöhung der Tageslichtsumme. Das Pflanzenwachstum im Gewächshaus wurde durch verschiedene Lichteigenschaften positiv beeinflusst, am stärksten durch den kurzwelligen Blaulichtanteil (443 nm). Der Nährwert wurde hingegen durch eine Verstärkung des kurzwelligen Grünlichtanteils (515 nm) verbessert, welcher zudem in der Klimakammer das Pflanzenwachstum am stärksten gefördert hat. Folglich

sind Zweiband-Emissionsspektren (blau und rot) in Klimaschränken und *vertical farming* nicht optimal im Hinblick auf das Pflanzenwachstum und den Nährwert. Dies gilt auch für die Natriumhochdrucklampen, die als Belichtung in traditionellen Gewächshäusern eingesetzt werden. Diese emittieren vor allem im längerwelligen grünen und kurzwelligen roten Spektralbereich. Die vorliegenden Ergebnisse deuten hingegen auf eine besondere Bedeutung des blauen und kurzwelligen Grünlichtanteils für gute Ernteerträge und Nährwerte hin.

Durch eine Kombination verschiedener Auswertungsmethoden konnte der Einfluss von Lichtintensität und spektraler Lichtzusammensetzung differenziert betrachtet werden. Neben einer Aussage bezüglich der Signifikanz einer Reaktion war es möglich, deren Stärke zu quantifizieren und zu vergleichen. Anhand einer Clusterbildung konnte zudem dargestellt werden, inwieweit Parameter gleich auf eine Lichtmodifizierung reagieren bzw. welche Parameter nicht simultan durch bestimmte Lichtbedingungen gesteigert werden können.

7. ZUSAMMENFASSUNG & SCHLUSSFOLGERUNGEN

Anhand der Ergebnisse konnte gezeigt werden, dass die Lichtbedingungen die nutritive Qualität und den Ertrag von *Persicaria odorata* in einem hohen Maße beeinflussen, weswegen diese Wachstumsbedingung bei Möglichkeit sorgfältig eingestellt werden sollte. Obgleich das Thema Lichteinfluss auf Gartenbauerzeugnisse bereits Gegenstand vieler Studien war, konnten in der vorliegenden Arbeit durch Berücksichtigung verschiedener Versuchsstandorte (Klimakammer, Gewächshaus) und eines breiten Inhaltsstoffspektrums, Lichtmodifizierungen mit Hilfe von monochromatischen LEDs und der Überdeckung mit Folien, der Einbeziehung weiterer Wachstumsbedingungen sowie dem Anwenden verschiedener statistischer Auswertungsmethoden neue Aspekte im Hinblick auf die Wirkung der Lichtbedingungen auf Nährwert und Ertrag von *P. odorata* unter praxisnahen Bedingungen ausgearbeitet werden. Von zentraler Bedeutung war eine getrennte Bewertung des Einflusses der Lichtintensität und der spektralen Lichtzusammensetzung, welche in bisherigen Studien meist nicht konsequent erfolgte.

Die Versuchspflanze *P. odorata* erreichte bereits 38 Tage (Umpflanzen der Stecklinge nach 10 Tagen in Mitscherlichgefäße, eine Woche Akklimatisierung, drei Wochen Versuchszeitraum) nach der Stecklingsvermehrung Erntequalität. Da die Pflanze in Bezug auf ihre Inhaltsstoffe noch relativ unbekannt ist, liefert die vorliegende Arbeit neue Erkenntnisse und zeigte einen insgesamt sehr hohen Nährwert im Vergleich mit anderen Gemüsekräutern. Analysen bereits untersuchter Inhaltsstoffe bestätigten Literaturwerte bzw. lagen meist darüber. Aufgrund der großen Anzahl an untersuchten Inhaltsstoffgruppen wurden etablierte Screeningmethoden für die Analyse verwendet. Bei der Diskussion stellte sich jedoch heraus, dass die Methoden für die Bestimmungen des Gesamtpolyphenolgehalts und der antioxidativen Kapazität in ihrer Aussagekraft begrenzt sind. Ferner wäre es, sowohl für eine Klärung der pflanzenphysiologischen Vorgänge als auch für die ernährungsphysiologische Bewertung, relevant gewesen, einzelne Carotinoide (α -, β -Carotin, β -Cryptoxanthin, Lutein, Lycopin, Zeaxanthin und Violaxanthin) zu bestimmen. Dennoch war die Wahl der Methoden insgesamt sinnvoll, um ein möglichst breites Inhaltsstoffspektrum untersuchen zu können.

Eine differenzierte Betrachtung des Einflusses der Bestrahlungsstärke und der spektralen Lichtzusammensetzung auf das Pflanzenwachstum und den Nährwert ist einzig auf Grundlage des Versuchsaufbaus unter praxisnahen Bedingungen kaum umsetzbar. Nur durch die Auswertung anhand verschiedener statistischer Methoden war es möglich, die Hypothesen zu bearbeiten. Übereinstimmend wurde in der Literatur eine Abhängigkeit der Biomassebildung von der Tageslichtsumme bzw. Bestrahlungsstärke beschrieben. Daraus wurde abgeleitet, dass **geringe Lichtintensitäten der photosynthetisch relevanten Spektralbereiche zu geringeren Frisch- und Blattmassen führen und folglich auch die geringen Tageslichtsummen in der Klimakammer eine Reduktion der Erträge im Vergleich zum Gewächs-**

haus bewirken (Hypothese 1). Für alle Wachstumsparameter konnten standortbezogene, lineare Regressionen erstellt werden. Dadurch wird die Annahme bestätigt, dass Reduktionen der Tageslichtsumme das Pflanzenwachstum verringern. Jedoch gibt es Einschränkungen. Die Ergebnisse im Gewächshaus wurden möglicherweise beeinflusst durch die Lichtverteilung im Tagesverlauf bzw. Schwankungen zwischen den Versuchstagen sowie Maximal- und Minimalwerte, auch in Abhängigkeit vom Versuchsmonat. Multiple Korrelationen unter Berücksichtigung der Temperatur bestätigen, dass im Gewächshaus eine Einschätzung des Einflusses der Tageslichtsumme nur unter Berücksichtigung weiterer Wachstumsbedingungen sinnvoll ist. Dass auch weitere Faktoren relevant waren wird besonders auch dann offensichtlich, wenn die Ergebnisse aus dem Gewächshaus mit der Klimakammer verglichen werden. Während im Gewächshaus durchschnittliche Tageslichtsummen von ca. $30\text{--}40 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ erforderlich waren für einen guten Ernteertrag, wurden in der Klimakammer die gleichen Ernteerträge bereits bei Tageslichtsummen von $8 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ erreicht. Verringerungen der Erträge bei einem Anbau in der Klimakammer konnten folglich nicht beobachtet werden, sodass die Hypothese insgesamt nur teilweise bestätigt wird. Neben Unterschieden bei den weiteren Kultivierungsparametern könnte auch die spektrale Lichtzusammensetzung relevant gewesen sein. Diese unterschied sich deutlich zwischen dem Sonnenlicht und den Dreiband-Leuchtstoffröhren. Auch die Versuche mit monochromatischen LEDs als Zusatzbestrahlung deuten einen Einfluss der spektralen Lichtzusammensetzung an.

Diesbezüglich wurde angenommen, dass blaue und rote Spektralbereiche das Pflanzenwachstum fördern (Hypothese 2). Diese Hypothese kann durch die vorliegende Arbeit eindeutig bestätigt werden. Das Pflanzenwachstum wurde bei Erhöhungen der Tageslichtsummen durch eine Verstärkung der kurzwelligen Blau- und Rotlichtanteile deutlich gesteigert. Bezüglich der Frischmasse im Gewächshaus wurden Steigerungen um 13% bzw. 9,9% erreicht (spektralbereichsneutral: 0,96%). Von großer Relevanz war das BR:G-Verhältnis, das den Anteil des Lichtspektrums beschreibt, der präferiert durch Chlorophyll absorbiert wird. Somit war die Bestrahlungsstärke/ Tageslichtsumme wichtig für den Aufbau von Biomasse, entscheidender war jedoch, durch welche Spektralbereiche die Bestrahlungsstärke gesteigert wurde.

Auch im Hinblick auf den Nährwert fehlt in der Literatur häufig eine getrennte Betrachtung des Einflusses der Bestrahlungsstärke/ Tageslichtsumme und der spektralen Lichtzusammensetzung. Zudem wurden häufig nur einzelne Inhaltsstoffe untersucht, sodass eine allgemeine Aussage bezüglich der Beeinflussung des Nährwertes durch die Lichtbedingungen bislang nicht zufriedenstellend vorliegt. **Auf Grundlage verschiedener Studien wurde angenommen, dass höhere Tageslichtsummen zu Steigerungen der Inhaltsstoffgehalte führen (Hypothese 3).** Diesbezüglich muss jedoch differenziert werden. Im Rahmen der erreichten Tageslichtsummen im Gewächshaus gab es positive, lineare Zusammenhänge mit den Gehalten an Polyphenolen und Flavonoiden, jedoch unterschieden sich die Inhaltsstoffgehalte kaum in einem Bereich der Tageslichtsummen zwischen $20\text{--}40 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Die meisten Inhaltsstoffe reagierten im Gewächshaus hingegen nicht auf die unterschiedlichen Tageslichtsummen, der Anthocyangehalt nahm bei zunehmenden Tageslichtsummen sogar ab. Somit können im Gewächshaus bei

den Tageslichtsummen, die für einen guten Ernteertrag erforderlich sind, auch gute Nährwerte im Hinblick auf die organischen Inhaltsstoffe erreicht werden. Die Hypothese wird dennoch nicht bestätigt, insbesondere unter Berücksichtigung der Versuche in der Klimakammer. Trotz deutlich geringerer Tageslichtsummen wurden unter kontrollierten Bedingungen höhere Polyphenol- und Flavonoidgehalte sowie eine höhere antioxidative Kapazität bestimmt. Bei Betrachtung der Ascorbinsäure, Polyphenolen und der antioxidativen Kapazität waren sogar nur $5\text{--}7\text{ mol m}^{-2}\text{ d}^{-1}$ erforderlich um die höchsten Werte zu erhalten. Lediglich die Flavonoide deuten an, dass eine Erhöhung über $10\text{ mol m}^{-2}\text{ d}^{-1}$ hinaus zu einer weiteren Steigerung führen könnte. Auch im Hinblick auf die Mineralstoffgehalte wurden in der Klimakammer, meist bei Tageslichtsummen $< 4\text{ mol m}^{-2}\text{ d}^{-1}$, die gleichen Gehalte erreicht wie im Gewächshaus bei $42\text{ mol m}^{-2}\text{ d}^{-1}$. Daher liegen die optimalen Tageslichtsummen für den Nährwert in der Klimakammer unterhalb der Tageslichtsumme, die für eine Ertragsmaximierung erforderlich wäre. Der Vergleich der Versuchsstandorte zeigt, dass die Bestrahlungsstärke/ Tageslichtsumme nicht der einzige Faktor war, der die Inhaltsstoffgehalte beeinflusst hat. **Aufgrund der Absorption durch Photorezeptoren, welche involviert sind in die Synthese von Inhaltsstoffen, wurde angenommen, dass insbesondere Erhöhungen der Blau- und Rotlichtanteile zu Steigerungen der Inhaltsstoffgehalte und somit des Nährwertes der Pflanzen führen (Hypothese 4).** Auch diese Hypothese kann nicht eindeutig bestätigt werden. Steigerungen der Inhaltsstoffgehalte durch blaues und rotes Licht wurden nur in einzelnen Versuchsreihen bestimmt, generelle Aussagen sind nicht möglich. Lediglich im Hinblick auf die anorganischen Inhaltsstoffe deutete sich bei mehreren Substanzen ein Zusammenhang mit dem B:R-Verhältnis an.

Im Gegensatz dazu wurden grünes Licht, ein niedriges R:FR-Verhältnis und ein geringer Blaulichtanteil als Charakteristika für Schattenbedingungen mit einer reduzierten Biomassebildung und geringeren Gehalten antioxidativ wirksamer Substanzen assoziiert (Hypothese 5). Diese Hypothese muss ebenfalls differenziert betrachtet werden. Anders als bei den Blau- und Rotlichtanteilen führte eine Verstärkung des kurzwelligen Grünlichtanteils versuchsreihenübergreifend zu einer hohen Nährwertverbesserung. Darüber hinaus wurde in vielen Versuchsreihen auch das Pflanzenwachstum gesteigert. Bei einer ganztägigen Zusatzbestrahlung lag die Steigerung mit 27% (bei Erhöhung der Tageslichtsumme um 1% durch Supplementierung mit kurzwelligem Grünlicht, 515 nm) sogar höher als bei einer Supplementierung mit kurzwelligen Blau- und Rotlicht bei gleicher Strahlungsstärke. Ähnlich verhielt es sich mit dem R:FR-Verhältnis, welches negativ mit den meisten Wachstumsparametern korrelierte. Reduzierte Biomassen und ein verstärktes Streckungswachstum bei geringeren Blaulichtanteilen und höheren längerwelligen Grünlichtanteilen (551-600 nm) bestätigen hingegen teilweise die Hypothese.

Insgesamt deutete die vorausgegangene Literaturrecherche und die Beteiligung der untersuchten Inhaltsstoffe an der photosynthetischen Energiegewinnung und insbesondere dem Schutz vor photooxidativen Schädigungen an. **Deswegen wurde angenommen, dass die meisten Inhaltsstoffe aufgrund ähnlicher Funktionen auch auf die Lichtbedingungen gleich reagieren (Hypothese 6).** Diese Hypothese

konnte nicht bestätigt werden, noch nicht einmal für die Polyphenole und Untergruppen. Dies bedeutet, dass, obgleich ähnliche Funktionen für die Gesamtpolyphenole, Flavonoide und Anthocyane beschrieben werden, vermutlich spezifische Funktionen oder Mechanismen die Synthese bestimmen. Dass auch Inhaltsstoffe, die in der Literatur mehrheitlich mit einer Prävention vor photooxidativen Schädigungen assoziiert werden, nicht oder nur bedingt auf Steigerungen der Tageslichtsummen reagierten, lässt vermuten, dass weitere Faktoren den Bedarf und die Synthese beeinflusst haben. Daher sollten auch im Hinblick auf den Nährwert alle Wachstumsbedingungen berücksichtigt werden und nicht nur die Lichtbedingungen.

Eine überraschende Erkenntnis war, dass bei einem Anbau in der Klimakammer trotz starker Abweichungen des Lichtspektrums vom Sonnenlichtspektrum und deutlich geringerer Bestrahlungsstärken gleiche Ernteerträge und Nährwerte möglich waren wie im Gewächshaus. Ferner war der Nährlösungsverbrauch in der Klimakammer um durchschnittlich 36% geringer als im Gewächshaus. Dadurch bietet sich der Anbau von Gemüsepflanzen in Indoor-Farmen in unseren Breitengraden als ressourcensparende, wachstumsoptimierende und vor allem saisonunabhängige Alternative zum Gewächshaus an. Durch die Unabhängigkeit vom Sonnenlicht können die Pflanzen in Regalsystemen kultiviert werden, wodurch, im Vergleich zum Gewächshaus, mehr Pflanzen pro Quadratmeter Bodenfläche angebaut werden können. Dies ist platzsparend in Großstädten und verringert die Versiegelung von Bodenfläche. Zudem sind die Ergebnisse ein Indiz dafür, dass Pflanzen nicht das Breitbandspektrum der Sonne benötigen, jedoch auch das Dreiband-Emissionsspektrum der Leuchtstofflampen nicht die optimalen Lichtbedingungen darstellt. Die positiven Wirkungen des kurzwelligen Grünlichtanteils deuten ferner an, dass das Zweibandspektrum (blau/ rot) im kontrollierten Anbau überdacht werden sollte. Auch im Hinblick auf die traditionell eingesetzten Natriumhochdrucklampen im Gewächshaus zeigen die Ergebnisse ein Optimierungspotenzial. Der, durch Natriumhochdrucklampen deutlich verstärkte langwellige Grünlichtanteil, wird anhand der vorliegenden Ergebnisse mit einer negativen Wirkung auf Pflanzenwachstum und Nährwert assoziiert. Effizienter wäre eine Verstärkung der kurzwelligen Blau- und Grünlichtanteile.

Insbesondere die erreichten Erhöhungen der Ascorbinsäure- und Eisengehalte sind aus Sicht der Humannahrung von Interesse, da diesbezüglich die Aufnahmeempfehlungen in Deutschland von einem signifikanten Anteil der Bevölkerung nicht erreicht werden. Weiterhin werden für Polyphenole, Kalium, Calcium und Magnesium viele gesundheitsfördernde Wirkungen beschrieben, die eine gesteigerte Aufnahme, bei den Mineralstoffen auch über die Aufnahmeempfehlungen hinaus, erstrebenswert machen. Relevant sind zudem die gemessenen Reduktionen des Nitratgehalts, der aus gesundheitlichen Gründen reglementiert ist. Von daher kann der Nährwert, zumindest im Hinblick auf einige Inhaltsstoffe, durch die Lichtbedingungen während des Anbaus verbessert werden. Jedoch wird der Nährwert als Produkteigenschaft bei frischen Gemüse oder Topfpflanzen aktuell nicht beworben und ist nur bei verarbeiteten Produkten relevant. Bei der Vermarktung als frisches Blattgemüse könnten die Inhaltsstoffgehalte je-

doch aufgrund eines anderen Aspektes interessant sein. Mehrere Substanzen beeinflussen die Farbgebung der Blätter, wodurch beispielsweise ein hoher Anthocyangehalt interessant wird, der für die unterseitige Rotfärbung der Blätter verantwortlich ist. Im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit des Anbaus ist die Ertragsmenge wichtig, welche ebenfalls stark durch die Lichtbedingungen beeinflusst wurde. Bereits im August war der Ertrag um 52% geringer als im Juni und Juli, im Oktober um 65%. Durch einen geringen Energieeinsatz können bei einer gezielten Bestrahlung mit bestimmten Spektralbereichen während strahlungsschwacher Monate die Ertragsunterschiede zu den strahlungsstarken Monaten deutlich reduziert werden.

Hohe Steigerungen bei einigen Inhaltsstoffgehalten lassen das große Potential erkennen, bereits durch leichte Modifikationen der Lichtbedingungen die nutritive Qualität von *Persicaria odorata* zu verbessern und zugleich den Ertrag zu erhöhen. Insbesondere führt die Differenzierung des Einflusses der Bestrahlungsstärke und der spektralen Lichtzusammensetzung durch den Versuchsaufbau und die statistische Auswertung zu neuen Erkenntnissen. Eine gezielte Verstärkung bestimmter Abschnitte des Lichtspektrums ist deutlich effizienter als eine gleichmäßige Erhöhung über das gesamte Lichtspektrum. Dabei wurden die höchsten Steigerungen durch Spektralbereiche erzielt, die nicht im Emissionsspektrum der traditionell in Gewächshäusern eingesetzten Natriumhochdrucklampen liegen. Die Zusatzbeleuchtung in Gewächshäusern sollte deswegen sorgfältig ausgewählt werden, ist aber prinzipiell vor allem während strahlungsschwachen Monaten sinnvoll, während denen bereits LEDs mit einer vergleichsweise schwachen Strahlungsstärke den Ertrag und die nutritive Qualität von Gemüsekräutern deutlich erhöhten. Ferner zeigen die Ergebnisse, dass die bisher häufig eingesetzten Bestrahlungen mit Blau- und Rotlicht in kontrollierten Anbausystemen zwar wichtig für den Aufbau von Biomasse, jedoch nicht optimal im Hinblick auf den Nährwert sind. Dieser wird, bei gleichzeitiger Steigerung der Biomassebildung, bei *P. odorata* durch eine Verstärkung des kurzwelligen Grünlichtes deutlich verbessert. Gleiche Erträge und Nährwerte bei einem deutlichen reduzierten Nährlösungsverbrauch in der Klimakammer belegen, dass allgemein ein Anbau von *P. odorata* in Indoor-Farmen mit einer besseren Kontrollierbarkeit der Wachstumsbedingungen und des Ressourceneinsatzes ohne Ernteverluste oder Verschlechterungen des Nährwertes möglich ist.

Insgesamt können die gewonnenen Erkenntnisse helfen, im Gartenbau Lichtmodifikationen möglichst effizient für die Steigerung der nutritiven Qualität und der Ernteerträge einzusetzen. Im Hinblick auf aktuell nicht erreichte Aufnahmeempfehlungen für Vitamin C und verschiedene Mineralstoffe sowie prognostizierte Reduktionen des Obst- und Gemüseverzehrs in Deutschland zeigen die Ergebnisse das Potential, durch Modifikationen der Lichtbedingungen nicht nur den Ertrag, sondern auch den Nährwert pflanzlicher Erzeugnisse deutlich zu steigern und dadurch die Versorgungslage mit gesundheitsfördernden bzw. essentiellen pflanzlichen Inhaltsstoffen zu verbessern.

8. EMPFEHLUNGEN FÜR WEITERE FORSCHUNGEN

Im Rahmen der Arbeit ergaben sich einige Fragen, die, auch nach weitgreifender Literaturrecherche, nicht zufriedenstellend beantwortet werden konnten. Weitere Forschungen im Hinblick auf die Beeinflussung der Erträge und der nutritiven Qualität von Gartenbauerzeugnissen durch das Licht und andere Faktoren wären jedoch von großem Interesse, da die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zeigen, dass bereits durch geringfügige Veränderungen der Lichtbedingungen deutliche Steigerungen der Erträge und des Nährwertes erreicht werden können.

Welche Bestrahlungsdauer ist erforderlich für die Akkumulation der einzelnen Inhaltsstoffe?

Insbesondere bei den Versuchen im Gewächshaus war die Bewertung des Einflusses der Bestrahlungsstärke auf die Akkumulation der Inhaltsstoffe schwierig, da nicht eindeutig geklärt ist, welcher Zeitraum für die Synthese relevant ist. In der vorliegenden Arbeit wurde für die organischen Inhaltsstoffe ein Zeitraum von drei Tagen gewählt, der in der Literatur genannt wurde. Da jedoch an manchen Stellen auch kürzere Zeiträume angegeben wurden, wäre es wichtig genauere Angaben zu haben. Dadurch könnte nicht nur der Einfluss der Kultivierungsbedingungen auf die Inhaltsstoffe besser dargestellt, sondern für den Anbau Bestrahlungsregimes entwickelt werden mit dem Ziel, Ressourcen zu schonen und ein Produkt mit hohem Nährwert zu erhalten.

Welche Wirkung hat der „grüne“ Spektralbereich? Was sind die regulatorischen Hintergründe?

Der sogenannte „grüne“ Spektralbereich hat sich in den letzten Jahren in der Wahrnehmung der Forscher gewandelt. Wurde zunächst angenommen, dass das grüne Licht die photomorphogenetischen Prozesse und die Inhaltsstoffbildung unterdrückt, zeigen aktuelle Studien fördernde Wirkungen bestimmter Bereiche. Somit waren die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zwar etwas unerwartet, jedoch nicht vollkommen überraschend. Jedoch ist es bemerkenswert, dass die Wirkung des kurzwelligen Grünlichtbereichs auf die Biomassebildung und Akkumulation antioxidativ wirksamer Inhaltsstoffe stärker war als die der kurzwelligen Blau- und Rotlichtanteile. Grünes Licht wird geringfügig durch Cryptochrome und Phytochrome absorbiert. Jedoch hätte eine Involvierung von Cryptochromen und Phytochromen stärkere Wirkungen des Blau- und Rotlichts erwarten lassen, die jedoch nicht beobachtet wurden. Diskutiert wird deswegen eine Signalvermittlung bedingt durch eine verstärkte Bildung reaktiver Sauerstoffspezies aufgrund des tieferen Eindringens des grünen Lichtes in die Blätter bzw. Pflanzen. Jedoch sind die Mechanismen nicht abschließend geklärt. Erkenntnisse könnten dazu dienen zu verstehen, inwieweit die Absorption durch bekannte Photosynthesepigmente und Photorezeptoren eine Aussage ermöglicht im Hinblick auf die Wirkung einzelner Spektralbereiche in der Pflanze.

Inwieweit beeinflussen andere Kultivierungsbedingungen die Wirkung des Lichtes?

Sowohl Bestrahlungsstärke und Lichtspektrum als auch andere Kultivierungsparameter, interagieren im Hinblick auf ihre pflanzenphysiologischen Wirkung. Verschiedene Regulatoren photomorphogenetischer Reaktionen wurden als Bestandteile mehrerer Signalkaskaden identifiziert, wodurch eine Induktion über verschiedene Mechanismen denkbar ist. Auch in der vorliegenden Arbeit wurde eine Beeinflussung fast aller Untersuchungsparameter durch die Temperatur beobachtet. Ein möglicher Einfluss durch die Luftfeuchtigkeit war aufgrund der Abhängigkeit von der Temperatur nicht eindeutig zu belegen, ist jedoch auch wahrscheinlich. Für eine Einstellung optimaler Bedingungen in kontrollierten Systemen wären weitere Kenntnisse über die Vernetzung der Signalkaskaden der einzelnen Kultivierungsparameter wichtig, inwieweit diese sich in ihrer Wirkung verstärken oder hemmen oder eventuell auch ersetzbar sind. Daraus könnte zudem abgeleitet werden, auf welchen Wegen eine gewünschte Reaktion erreicht werden kann, um dann die möglicherweise praktikabelste oder ressourcensparenste Möglichkeit umzusetzen.

Welchen Einfluss hat die Mutterpflanze auf die Eigenschaften der Stecklinge?

Bei verschiedenen, meist verholzenden Pflanzen, wurde ein Einfluss des Alters der Mutterpflanze, der Wuchsposition des Stecklings und den Kultivierungsbedingungen der Mutterpflanzen, einschließlich Bestrahlungsstärke und Photoperiodismus, auf das Wachstum der Stecklinge, speziell der Bewurzelung, nachgewiesen. In der vorliegenden Arbeit wurden alle Stecklinge von der gleichen Mutterpflanze entnommen, jedoch lag zwischen den Versuchen in der Klimakammer und den letzten Versuchen im Gewächshaus ein Zeitraum von etwa 22 Monaten. Im Hinblick auf die Inhaltsstoffgehalte der Kontrollen wurden vergleichbare Gehalte bestimmt in den Pflanzen der Versuchsreihen „KK13“ und „GwH13“, welche zeitlich nahe stattfanden, sowie in den Versuchsreihen „GwH14“, „GwH14, nachts“ und „GwH14, 24h“, die ebenfalls innerhalb von 4-5 Monaten durchgeführt wurden. Zwischen den beiden Versuchsjahren gab es hingegen große Unterschiede, die nicht erklärbar sind. Folglich stellt sich die Frage, ob das Alter der Mutterpflanze, die Wuchsposition des Stecklings oder weitere Faktoren die Ergebnisse beeinflusst haben können.

In welcher Menge sollten pflanzliche Inhaltsstoffe mit nachweislich positiven Effekten für die Gesundheit aufgenommen werden, für die es bislang keine Aufnahmeempfehlungen gibt?

Obgleich das Ziel der Arbeit war, durch das Erfassen eines breiten Spektrums wertvoller Inhaltsstoffe Aussagen bezüglich des Nährwertes bzw. einer Beeinflussung des Nährwertes durch die Lichtmodifikationen zu treffen, ist dies auch mit der hohen Anzahl an untersuchten Verbindungen nicht abschließend möglich. Insbesondere fehlende Richtwerte für die Aufnahme von Polyphenolen und Carotinoiden ohne Provitamin A-Wirkung erschweren eine Bewertung der Gehalte bzw. der Gehaltsveränderungen. Insgesamt wären im Hinblick auch auf die Beurteilung sogenannter „Superfoods“ entsprechend Werte von Interesse.

Wird der Polyphenolgehalt durch die derzeit verwendeten Methoden geeignet dargestellt?

Sowohl die vorliegenden Ergebnisse als auch einige Literaturquellen, deuten auf Probleme der Bestimmung des Gesamtpolyphenolgehalts und der antioxidativen Kapazität hin. Obgleich hohe Korrelationen zwischen den beiden Untersuchungsparametern erwartet wurden, da Polyphenole die mengenmäßig wichtigsten Antioxidantien in *P. odorata* darstellen und beide Bestimmungen auf den radikalquenchen- den Eigenschaften der gleichen Probe beruhen, lagen kaum Zusammenhänge vor. Der Grund für diese Ergebnisse ist unklar. Beim Versuch, die Beobachtungen durch eine Literaturrecherche zu erklären, wurden die Limitierungen deutlich, die bei diesen Methoden vorliegen. Die Polyphenolbestimmung beruht auf der antioxidativen Kapazität der Verbindungen, jedoch sind diese unterschiedlich hoch bei den einzelnen Verbindungen und andere Substanzen können interferieren und somit die Ergebnisse verfälschen. Folglich stellt sich die Frage, unter welchen Bedingungen und Annahmen die Folin-Ciocalteu-Methode zuverlässige Erkenntnisse im Hinblick auf den Polyphenolgehalt einer Probe liefert.

9. LITERATURVERZEICHNIS

- Aaron, K.J., Sanders, P.W., 2013. Role of dietary salt and potassium intake in cardiovascular health and disease: A review of the evidence. *Mayo Clin. Proc.* 88, 987–995. <https://doi.org/10.1016/j.mayocp.2013.06.005>
- Abdollahi, M., Ranjbar, A., Shadnia, S., Nikfar, S., Rezaie, A., 2004. Pesticides and oxidative stress: a review. *Med. Sci. Monit.* 10, 141–147.
- Abello, N., Kerstjens, H.A.M., Postma, D.S., Bischoff, R., 2009. Protein tyrosine nitration: Selectivity, physicochemical and biological consequences, denitration, and proteomics methods for the identification of tyrosine-nitrated proteins. *J. Proteome Res.* 8, 3222–3238.
- Abrams, S.A., O'Brien, K.O., Liang, L.K., Stuff, J.E., 1995. Differences in calcium absorption and kinetics between black and white girls aged 5–16 years. *J. Bone Miner. Res.* 10, 829–833. <https://doi.org/10.1002/jbmr.5650100521>
- Adams, M.A., Pate, J.S., 1992. Availability of organic and inorganic forms of phosphorus to lupins (*Lupinus* spp.). *Plant Soil* 145, 107–113. <https://doi.org/10.1007/BF00009546>
- Adamson, J.W., Finch, C.A., 1975. Hemoglobin function, oxygen affinity, and erythropoietin. *Annu. Rev. Physiol.* 37, 351–369.
- Agata, W., Hakoyama, S., Kawamitsu, Y., 1985. Influence of light intensity, temperature and humidity on photosynthesis and transpiration of *Sasa nipponica* and *Arundinaria pygmaea*. *Bot. Mag. Tokyo* 98, 125–135. <https://doi.org/10.1007/BF02488792>
- Agati, G., Azzarello, E., Pollastri, S., Tattini, M., 2012. Flavonoids as antioxidants in plants: Location and functional significance. *Plant Sci.* 196, 67–76. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2012.07.014>
- Agati, G., Matteini, P., Goti, A., Tattini, M., 2007. Chloroplast-located flavonoids can scavenge singlet oxygen. *New Phytol.* 174, 77–89. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.01986.x>
- Agusti, J., Herold, S., Schwarz, M., Sanchez, P., Ljung, K., Dun, E.A., Brewer, P.B., Beveridge, C.A., Sieberer, T., Sehr, E.M., Greb, T., 2011. Strigolactone signaling is required for auxin-dependent stimulation of secondary growth in plants. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 109, 20242–20247. <https://doi.org/10.1073/pnas.1211779109>
- Ahmad, M., Cashmore, A.R., 1997. The blue-light receptor cryptochrome 1 shows functional dependence on phytochrome A or phytochrome B in *Arabidopsis thaliana*. *Plant J.* 11, 421–427.
- Ahmad, M., Cashmore, A.R., 1993. HY4 gene of *A. thaliana* encodes a protein with characteristics of a blue-light photoreceptor. *Nature* 366, 162–166.
- Ahmad, M., Grancher, N., Heil, M., Black, R.C., Giovani, B., Galland, P., Lardemer, D., 2002. Action spectrum for cryptochrome-dependent hypocotyl growth inhibition in *Arabidopsis*. *Plant Physiol.* 129, 774–785. <https://doi.org/10.1104/pp.010969>
- Ahmad, M., Lin, C., Cashmore, A.R., 1995. Mutations throughout an *Arabidopsis* blue light photoreceptor impair blue light responsive anthocyanin accumulation and inhibition of hypocotyl elongation. *Plant J.* 8, 653–658. <https://doi.org/10.1046/j.1365-313X.1995.08050653.x>
- Ahongshangbam, S.K., Shantibala Devi, G.A., Chattopadhyay, S., 2014. Bioactive compounds and antioxidant activity of *Polygonum odoratum* Lour. *Int. J. Basic Appl. Biol.* 2, 94–97.

- Airman, D.P., Houter, G., 1990. Influence of radiation and humidity on transpiration: Implications for calcium levels in tomato leaves. *J. Hortic. Sci.* 65, 245–253.
- Airriess, C.A., Clawson, D.L., 1994. Vietnamese market gardens in New Orleans. *Geogr. Rev.* 84, 16–31.
- Al-Duais, M., Müller, L., Böhm, V., Jetschke, G., 2009. Antioxidant capacity and total phenolics of *Cyphostemma digitatum* before and after processing: Use of different assays. *Eur. Food Res. Technol.* 228, 813–821. <https://doi.org/10.1007/s00217-008-0994-8>
- Al-Sady, B., Ni, W., Kircher, S., Schäfer, E., Quail, P.H., 2006. Photoactivated phytochrome induces rapid PIF3 phosphorylation prior to proteasome-mediated degradation. *Mol. Cell* 23, 439–446. <https://doi.org/10.1016/j.molcel.2006.06.011>
- Al-Saikhan, M.S., Howard, L.R., Miller, J.C., 1995. Antioxidant activity and total phenolics in different genotypes of potato (*Solanum tuberosum*, L.). *J. Food Sci.* 60, 341–343. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1995.tb05668.x>
- Al Tanoury, Z., Piskunov, A., Rochette-Egly, C., 2013. Vitamin A and retinoid signaling: genomic and nongenomic effects. *J. Lipid Res.* 54, 1761–1775. <https://doi.org/10.1194/jlr.R030833>
- Alboresi, A., Gestin, C., Leydecker, M.T., Bedu, M., Meyer, C., Truong, H.N., 2005. Nitrate, a signal relieving seed dormancy in *Arabidopsis*. *Plant, Cell Environ.* 28, 500–512. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2005.01292.x>
- Alexander, M., Newmark, H., Miller, R.G., 1985. Oral beta-carotene can increase the number of OKT4+ cells in human blood. *Immunol. Lett.* 9, 221–224.
- Allen, D.J., Ort, D.R., 2001. Impacts of chilling temperatures on photosynthesis in warm-climate plants. *Trends Plant Sci.* 6, 36–41.
- Allen, G.J., Chu, S.P., Harrington, C.L., Schumacher, K., Hoffmann, T., Tang, Y.Y., Grill, E., Schroeder, J.I., 2001. A defined range of guard cell calcium oscillation parameters encodes stomatal movements. *Nature* 411, 1053–1057. <https://doi.org/10.1038/35082575>
- Allen, G.J., Kuchitsu, K., Chu, S.P., Murata, Y., Schroeder, J.I., 1999. *Arabidopsis* abi1-1 and abi2-1 phosphatase mutations reduce abscisic acid-induced cytoplasmic calcium rises in guard cells. *Plant Cell* 11, 1785–1798. <https://doi.org/10.2307/3871054>
- Allen, K.N., Dunaway-Mariano, D., 2004. Phosphoryl group transfer: evolution of a catalytic scaffold. *Trends Biochem. Sci.* 29, 495–503. <https://doi.org/10.1016/j.tibs.2004.07.008>
- Allen, R., 2004. Dopamine and iron in the pathophysiology of restless legs syndrome (RLS). *Sleep Med.* 5, 385–391. <https://doi.org/10.1016/j.sleep.2004.01.012>
- Allender, P.S., Cutler, J.A., Follmann, D., Cappuccio, F.P., Pryer, J., Elliott, P., 1996. Dietary calcium and blood pressure: A meta-analysis of randomized clinical trials. *Ann. Intern. Med.* 124, 825–831. <https://doi.org/10.7326/0003-4819-124-9-199605010-00007>
- Almeida Paz, I.C.L., Bruno, L.D.G., 2006. Bone mineral density: review. *Rev. Bras. Ciência Avícola* 8, 69–73. <https://doi.org/10.1590/s1516-635x2006000200001>
- Aloni, R., Aloni, E., Langhans, M., Ullrich, C.I., 2006. Role of cytokinin and auxin in shaping root architecture: Regulating vascular differentiation, lateral root initiation, root apical dominance and root gravitropism. *Ann. Bot.* 97, 883–893. <https://doi.org/10.1093/aob/mcl027>
- Altura, B.M., Altura, B.T., Gebrewold, A., Ising, H., Günther, T., 1984. Magnesium deficiency and hypertension: Correlation between magnesium-deficient diets and microcirculatory changes in situ. *Science* (80-.). 223, 1315–1317. <https://doi.org/10.1126/science.6701524>

- Aluko, B. T., Oloyede, O.I., Afolayan, A.J., 2012. Phytochemical and nutrient compositions of the leaves of *Ocimum canum* Sims. *African J. Biotechnol.* 11, 12697–12701. <https://doi.org/10.5897/ajb11.3418>
- Amorabé, B.E., Fleurat-Lessard, P., Chollet, J.F., Roblin, G., 2002. Antifungal effects of salicylic acid and other benzoic acid derivatives towards *Eutypa lata*: Structure-activity relationship. *Plant Physiol. Biochem.* 40, 1051–1060. [https://doi.org/10.1016/S0981-9428\(02\)01470-5](https://doi.org/10.1016/S0981-9428(02)01470-5)
- Amengual, J., Gouranton, E., van Helden, Y.G.J., Hessel, S., Ribot, J., Kramer, E., Kiec-Wilk, B., Razny, U., Lietz, G., Wyss, A., Dembinska-Kiec, A., Palou, A., Keijer, J., Landrier, J.F., Bonet, M.L., von Lintig, J., 2011. Beta-carotene reduces body adiposity of mice via BCMO1. *PLoS One* 6, 1–13. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0020644>
- Amengual, J., Ribot, J., Bonet, M.L., Palou, A., 2010. Retinoic acid treatment enhances lipid oxidation and inhibits lipid biosynthesis capacities in the liver of mice. *Cell. Physiol. Biochem.* 25, 657–666. <https://doi.org/10.1159/000315085>
- Amtmann, A., Troufflard, S., Armengaud, P., 2008. The effect of potassium nutrition on pest and disease resistance in plants. *Physiol. Plant.* 133, 682–691. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2008.01075.x>
- Anand, C.R., Linkswiler, H.M., 1974. Effect of protein intake on calcium balance of young men given 500 mg calcium daily. *J. Nutr.* 104, 695–700.
- Anderson, J.M., Goodchild, D.J., Boardman, N.K., 1973. Composition of the photosystems and chloroplast structure in extreme shade plants. *Biochem. Biophys. Bioenerg.* 325, 573–585. [https://doi.org/10.1016/0005-2728\(73\)90217-X](https://doi.org/10.1016/0005-2728(73)90217-X)
- Andon, B., Ilich, J.Z., Tzagournis, M.A., Matkovic, V., 1996. Magnesium balance low- or high-calcium consuming a low- or high-calcium diet. *Am. J. Clin. Nutr.* 63, 950–953.
- Andreo-Jimenez, B., Ruyter-Spira, C., Bouwmeester, H.J., Lopez-Raez, J.A., 2015. Ecological relevance of strigolactones in nutrient uptake and other abiotic stresses, and in plant-microbe interactions below-ground. *Plant Soil* 394, 1–19. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2544-z>
- Andronis, C., Barak, S., Knowles, S.M., Sugano, S., Tobin, E.M., 2008. The clock protein CCA1 and the bZIP transcription factor HY5 physically interact to regulate gene expression in *Arabidopsis*. *Mol. Plant* 1, 58–67. <https://doi.org/10.1093/mp/ssm005>
- Angus, J.F., Moncur, M.W., 1985. Models of growth and development of wheat in relation to plant nitrogen. *Aust. J. Agric. Res.* 36, 537–544. <https://doi.org/10.1071/AR9850537>
- Anila, L., Vijayalakshmi, N.R., 2003. Antioxidant action of flavonoids from *Mangifera indica* and *Emblca officinalis* in hypercholesterolemic rats. *Food Chem.* 83, 569–574. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(03\)00155-9](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(03)00155-9)
- Anter, E., Thomas, S.R., Schulz, E., Shapira, O.M., Vita, J.A., Keaney, J.F., 2004. Activation of endothelial nitric-oxide synthase by the p38 MAPK in response to black tea polyphenols. *J. Biol. Chem.* 279, 46637–46643. <https://doi.org/10.1074/jbc.M405547200>
- Antonini, E., 1965. Interrelationship between structure and function in hemoglobin and myoglobin. *Physiol. Rev.* 45, 123–170. <https://doi.org/10.1152/physrev.1965.45.1.123>
- Arasimowicz-Jelonek, M., Floryszak-Wieczorek, J., 2011. Understanding the fate of peroxynitrite in plant cells - from physiology to pathophysiology. *Phytochemistry* 72, 681–688.
- Araújo, J.R., Gonçalves, P., Martel, F., 2011. Chemopreventive effect of dietary polyphenols in colorectal cancer cell lines. *Nutr. Res.* 31, 77–87. <https://doi.org/10.1016/j.nutres.2011.01.006>

- Areekul, V., Phomkaivon, N., 2015. Thai indigenous plants: focusing on total phenolic content, antioxidant activity and their correlation on medicinal effects. *KMITL Sci. Technol. J.* 15, 10–23.
- Aronow, M.E., Chew, E.Y., 2014. AREDS2: Perspectives, recommendations, and unanswered questions. *Curr. Opin. Ophthalmol.* 25, 186–190. <https://doi.org/10.1097/ICU.0000000000000046>
- Arora, A., Byrem, T.M., Nair, M.G., Strasburg, G.M., 2000. Modulation of liposomal membrane fluidity by flavonoids and isoflavonoids. *Arch. Biochem. Biophys.* 373, 102–109.
- Arora, A., Sairam, R.K., Srivastava, G.C., 2002. Oxidative Stress and antioxidative system in plants. *Curr. Sci.* 82, 1227–1238.
- Arrigoni, O., Arrigoni-Liso, R., Calabrese, G., 1977. Ascorbic acid requirement for biosynthesis of hydroxyproline-containing proteins in plants. *FEBS Lett.* 82, 135–138.
- Arrigoni, O., De Tullio, M.C., 2002. Ascorbic acid: Much more than just an antioxidant. *Biochim. Biophys. Acta - Gen. Subj.* 1569, 1–9. [https://doi.org/10.1016/S0304-4165\(01\)00235-5](https://doi.org/10.1016/S0304-4165(01)00235-5)
- Arts, M.J.T., Haenen, G.R.M., Voss, H.-P., Bast, A., 2004. Antioxidant capacity of reaction products limits the applicability of the Trolox Equivalent Antioxidant Capacity (TEAC) assay. *Food Chem. Toxicol.* 42, 45–49. <https://doi.org/10.1016/J.FCT.2003.08.004>
- Asada, K., 2006. Production and scavenging of reactive oxygen species in chloroplasts and their functions. *Plant Physiol.* 141, 391–396. <https://doi.org/10.1104/pp.106.082040>
- Asada, K., 1999. The water-water cycle in chloroplasts: Scavenging of active oxygens and dissipation of excess photons. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 50, 601–639. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.50.1.601>
- Asada, K., 1992. Ascorbate peroxidase - a hydrogen peroxide-scavenging enzyme in plants. *Physiol. Plant.* 85, 235–241.
- Aslam, M., Huffaker, R.C., Rains, D.W., Rao, A.K.P., 1979. Influence of light and ambient carbon dioxide concentration on nitrate assimilation by intact barley seedlings. *Plant Physiol.* 63, 1205–1209.
- Aston, M.J., Lawlor, D.W., 1979. The relationship between transpiration, root water uptake, and leaf water potential. *J. Exp. Bot.* 30, 169–181.
- Athmann, M., Blasco, I., Köpke, U., 2011. Einfluss von Einstrahlungsintensität, Stickstoffangebot, Düngungsart und Hornkieselapplikation auf den Nitrat-, Ascorbinsäure- und Glucosinolatgehalt bei Salatrauke (*Eruca sativa*), in: Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau. pp. 398–401.
- Attridge, T.H., Smith, H., 1974. Density-labelling evidence for the blue-light-mediated activation of phenylalanine ammonia lyase in *Cucumis sativus* seedlings. *Biochim. Biophys. Acta* 343, 452–464. [https://doi.org/10.1016/0304-4165\(74\)90262-1](https://doi.org/10.1016/0304-4165(74)90262-1)
- Attridge, T.H., Smith, H., 1967. A phytochrome-mediated increase in the level of phenylalanine ammonia-lyase activity in the terminal buds of *Pisum sativum*. *Biochim. Biophys. Acta* 148, 805–807.
- Auger, C., Rouanet, J.M., Vanderlinde, R., Bornet, A., Décordé, K., Lequeux, N., Cristol, J.P., Teissedre, P.L., 2005. Polyphenols-enriched chardonnay white wine and sparkling pinot noir red wine identically prevent early atherosclerosis in hamsters. *J. Agric. Food Chem.* 53, 9823–9829. <https://doi.org/10.1021/jf050988m>

- Aviram, M., Dornfeld, L., Kaplan, M., Coleman, R., Gaitini, D., Nitecki, S., Hofman, A., Rosenblat, M., Volkova, N., Presser, D., Attias, J., Hayek, T., Fuhrman, B., 2002. Pomegranate juice flavonoids inhibit low-density lipoprotein oxidation and cardiovascular diseases: studies in atherosclerotic mice and in humans. *Drugs Exp. Clin. Res.* 28, 49–62.
- Awad, M.A., Wagenmakers, P.S., De Jager, A., 2001. Effects of light on flavonoid and chlorogenic acid levels in the skin of “Jonagold” apples. *Sci. Hortic. (Amsterdam)*. 88, 289–298.
- Azmi, A.S., Bhat, S.H., Hanif, S., Hadi, S.M., 2006. Plant polyphenols mobilize endogenous copper in human peripheral lymphocytes leading to oxidative DNA breakage: A putative mechanism for anticancer properties. *FEBS Lett.* 580, 533–538. <https://doi.org/10.1016/j.febslet.2005.12.059>
- Azuma, A., Yakushiji, H., Koshita, Y., Kobayashi, S., 2012. Flavonoid biosynthesis-related genes in grape skin are differentially regulated by temperature and light conditions. *Planta* 236, 1067–1080. <https://doi.org/10.1007/s00425-012-1650-x>
- Babior, B.M., 2000. Phagocytes and oxidative stress. *Am. J. Med.* 109, 33–44. [https://doi.org/10.1016/S0002-9343\(00\)00481-2](https://doi.org/10.1016/S0002-9343(00)00481-2)
- Babourina, O., Newman, I., Shabala, S., 2002. Blue light-induced kinetics of H⁺ and Ca²⁺ fluxes in etiolated wild-type and phototropin-mutant *Arabidopsis* seedlings. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 99, 2433–2438. <https://doi.org/10.1073/pnas.042294599>
- Bae, J.H., Park, S.Y., Oh, M.M., 2019. Growth and phenolic compounds of *Crepidiastrum denticulatum* under various blue light intensities with a fixed phytochrome photostationary state using far-red light. *Hortic. Environ. Biotechnol.* 60, 199–206. <https://doi.org/10.1007/s13580-018-0112-1>
- Bae, J.H., Park, S.Y., Oh, M.M., 2017. Supplemental irradiation with far-red light-emitting diodes improves growth and phenolic contents in *Crepidiastrum denticulatum* in a plant factory with artificial lighting. *Hortic. Environ. Biotechnol.* 58, 357–366. <https://doi.org/10.1007/s13580-017-0331-x>
- Bagchi, D., Garg, A., Krohn, R.L., Bagchi, M., Tran, M.X., Stohs, S.J., 1997. Oxygen free radical scavenging abilities of vitamin C and E, and grape seed proanthocyanidin extract in vitro. *Res. Commun. Mol. Pathol. Pharmacol.* 95, 179–189.
- Bahadoran, Z., Mirmiran, P., Azizi, F., 2013. Dietary polyphenols as potential nutraceuticals in management of diabetes: A review. *J. Diabetes Metab. Disord.* 12, 1–9. <https://doi.org/10.1186/2251-6581-12-43>
- Bahadoran, Z., Mirmiran, P., Ghasemi, A., Kabir, A., Azizi, F., Hadaegh, F., 2015. Is dietary nitrate/nitrite exposure a risk factor for development of thyroid abnormality? A systematic review and meta-analysis. *Nitric Oxide* 47, 65–76. <https://doi.org/10.1016/J.NIOX.2015.04.002>
- Bahorun, T., Luximon-Ramma, A., Crozier, A., Aruoma, O.I., 2004. Total phenol, flavonoid, proanthocyanidin and vitamin C levels and antioxidant activities of Mauritian vegetables. *J. Sci. Food Agric.* 84, 1553–1561. <https://doi.org/10.1002/jsfa.1820>
- Baig, M.M., Kelly, S., Loewus, F., 1970. L-ascorbic acid biosynthesis in higher plants from L-gulonono-1, 4-lactone and L-galactono-1, 4-lactone. *Plant Physiol.* 46, 277–280. <https://doi.org/10.1104/pp.46.2.277>
- Bailey, S., Walters, R.G., Jansson, S., Horton, P., 2001. Acclimation of *Arabidopsis thaliana* to the light environment: The existence of separate low light and high light responses. *Planta* 213, 794–801. <https://doi.org/10.1007/s004250100556>

- Bailey, S.J., Fulford, J., Vanhatalo, A., Winyard, P.G., Blackwell, J.R., DiMenna, F.J., Wilkerson, D.P., Benjamin, N., Jones, A.M., 2010. Dietary nitrate supplementation enhances muscle contractile efficiency during knee-extensor exercise in humans. *J. Appl. Physiol.* 109, 135–148. <https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00046.2010>
- Bailey, S.J., Winyard, P., Vanhatalo, A., Blackwell, J.R., DiMenna, F.J., Wilkerson, D.P., Tarr, J., Benjamin, N., Jones, A.M., 2009. Dietary nitrate supplementation reduces the O₂ cost of low-intensity exercise and enhances tolerance to high-intensity exercise in humans. *J. Appl. Physiol.* 107, 1144–1155. <https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00722.2009>
- Baker, E.M., Hodges, R.E., Hood, J., Sauberlich, H.E., March, S.C., Canham, J.E., 1971. Metabolism of ¹⁴C- and ³H-labeled L-ascorbic acid in human scurvy. *Am. J. Clin. Nutr.* 24, 444–454.
- Baligar, V.C., 1985. Potassium uptake by plants, as characterized by root density, species and K/Rb ratio. *Plant Soil* 85, 43–53.
- Ballaré, C.L., Casal, J.J., Kendrick, R.E., 1991. Responses of light-grown wild-type and long-hypocotyl mutant cucumber seedlings to natural and simulated shade light. *Photochem. Photobiol.* 54, 819–826.
- Ballaré, C.L., Pierik, R., 2017. The shade-avoidance syndrome: Multiple signals and ecological consequences. *Plant Cell Environ.* 40, 2530–2543. <https://doi.org/10.1111/pce.12914>
- Ballaré, C.L., Scopel, A.L., Sánchez, R.A., 1990. Far-red radiation reflected from adjacent leaves: An early signal of competition in plant canopies. *Science* (80-.). 247, 329–332. <https://doi.org/10.1126/science.247.4940.329>
- Ballottari, M., Dall'Osto, L., Morosinotto, T., Bassi, R., 2007. Contrasting behavior of higher plant photosystem I and II antenna systems during acclimation. *J. Biol. Chem.* 282, 8947–8958. <https://doi.org/10.1074/jbc.M606417200>
- Balzer, J., Rassaf, T., Heiss, C., Kleinbongard, P., Lauer, T., Merx, M., Heussen, N., Gross, H.B., Keen, C.L., Schroeter, H., Kelm, M., 2008. Sustained benefits in vascular function through flavanol-containing cocoa in medicated diabetic patients. A double-masked, randomized, controlled trial. *J. Am. Coll. Cardiol.* 51, 2141–2149. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2008.01.059>
- Banerjee, R., Schleicher, E., Meier, S., Viana, R.M., Pokorny, R., Ahmad, M., Bittl, R., Batschauer, A., 2007. The signaling state of Arabidopsis cryptochrome 2 contains flavin semiquinone. *J. Biol. Chem.* 282, 14916–14922. <https://doi.org/10.1074/jbc.M700616200>
- Barbary, O.M., El-Sohaimy, S.A., El-Saadani, M.A., Zeitoun, A.M.A., 2010. Antioxidant, antimicrobial and anti-HCV activities of lignan extracted from flaxseed. *Res. J. Agric. Biol. Sci.* 6, 247–256.
- Bartlett, R.J., Picarelli, C.J., 1973. Availability of boron and phosphorus as affected by liming an acid potato soil. *Soil Sci.* 116, 77–83.
- Bartoli, C.G., Tambussi, E.A., Diego, F., Foyer, C.H., 2009. Control of ascorbic acid synthesis and accumulation and glutathione by the incident light red/far red ratio in *Phaseolus vulgaris* leaves. *FEBS Lett.* 583, 118–122. <https://doi.org/10.1016/j.febslet.2008.11.034>
- Bartoli, C.G., Yu, J., Gómez, F., Fernández, L., McIntosh, L., Foyer, C.H., 2006. Inter-relationships between light and respiration in the control of ascorbic acid synthesis and accumulation in *Arabidopsis thaliana* leaves. *J. Exp. Bot.* 57, 1621–1631. <https://doi.org/10.1093/jxb/erl005>
- Bartosz, G., 1997. Oxidative stress in plants. *Acta Physiol. Plant.* 19, 47–64.
- Bates, T.R., Lynch, J.P., 2000. Plant growth and phosphorus accumulation of wild type and two

- root hair mutants of *Arabidopsis thaliana* (Brassicaceae). *Am. J. Bot.* 87, 958–963. <https://doi.org/10.2307/2656994>
- Batschauer, A., 1999. Light perception in higher plants. *Cell. Mol. Life Sci.* 55, 153–166. <https://doi.org/10.1007/s000180050282>
- Bauer, D., Viczian, A., Kircher, S., Nobis, T., Nitschke, R., Kunkel, T., Panigrahi, K.C.S., Adam, E., Fejes, E., Schäfer, E., Nagy, F., 2004. Constitutive photomorphogenesis 1 and multiple photoreceptors control degradation of phytochrome interacting factor 3, a transcription factor required for light signaling in *Arabidopsis*. *Plant Cell* 16, 1433–1445. <https://doi.org/10.1105/tpc.021568.saturated>
- Baumann, J., v. Bruchhausen, F., Wurm, G., 1980. Flavonoids and related compounds as inhibitors of arachidonic acid peroxidation. *Prostaglandins* 20, 627–639. [https://doi.org/10.1016/0090-6980\(80\)90103-3](https://doi.org/10.1016/0090-6980(80)90103-3)
- Baxter, A., Mittler, R., Suzuki, N., 2014. ROS as key players in plant stress signalling. *J. Exp. Bot.* 65, 1229–1240. <https://doi.org/10.1093/jxb/ert375>
- Baylis, G.T.S., 1970. Root hair and phycomycetous mycorrhizas in phosphorus-deficient soil. *Plant Soil* 33, 713–716.
- Beard, J.L., 2001. Iron biology in immune function, muscle metabolism and neuronal functioning. *J. Nutr.* 131, 568–580.
- Beatty, S., Murray, I.J., Henson, D.B., Carden, D., Koh, H.H., Boulton, M.E., 2001. Macular pigment and risk for age-related macular degeneration in subjects from a northern European population. *Investig. Ophthalmol. Vis. Sci.* 42, 439–446.
- Bechthold, A., 2015. New reference values for Vitamin C intake. *Ann. Nutr. Metab.* 67, 13–20. <https://doi.org/10.1159/000434757>
- Becker, T.W., Foyer, C., Caboche, M., 1992. Light-regulated expression of the nitrate-reductase and nitrite-reductase genes in tomato and in the phytochrome-deficient aurea mutant of tomato. *Planta* 188, 39–47.
- Beckman, J.S., Koppenol, W.H., 1996. Nitric oxide, superoxide, and peroxynitrite: The good, the bad, and the ugly. *Am. J. Physiol. - Cell Physiol.* 271, 1424–1437.
- Beggs, C.J., Kuhn, K., Böcker, R., Wellmann, E., 1987. Phytochrome-induced flavonoid biosynthesis in mustard (*Sinapis alba* L.) cotyledons. Enzymic control and differential regulation of anthocyanin and quercetin formation. *Planta* 172, 121–126. <https://doi.org/10.1007/BF00403037>
- Behr, U., Wiebe, H.J., 1992. Relation between photosynthesis and nitrate content of lettuce cultivars. *Sci. Hortic. (Amsterdam)*. 49, 175–179. [https://doi.org/10.1016/0304-4238\(92\)90155-6](https://doi.org/10.1016/0304-4238(92)90155-6)
- Bekri, S., Gual, P., Anty, R., Luciani, N., Dahman, M., Ramesh, B., Iannelli, A., Staccini-Myx, A., Casanova, D., Ben Amor, I., Saint-Paul, M.C., Huet, P.M., Sadoul, J.L., Gugenheim, J., Srai, S.K.S., Tran, A., Le Marchand-Brustel, Y., 2006. Increased adipose tissue expression of hepcidin in severe obesity is independent from diabetes and NASH. *Gastroenterology* 131, 788–796. <https://doi.org/10.1053/j.gastro.2006.07.007>
- Belkhodja, R., Morales, F., Sanz, M., Abadía, A., Abadía, J., 1998. Iron deficiency in peach trees: Effects on leaf chlorophyll and nutrient concentrations in flowers and leaves. *Plant Soil* 203, 257–268. <https://doi.org/10.1023/A:1004373202458>
- Bell, G.H., Cuthbertson, D.P., Orr, J., 1941. Strength and size of bone in relation to calcium intake. *J. Physiol.* 100, 299–317. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1941.sp003944>

- Bennie, J., Davies, T.W., Cruse, D., Gaston, K.J., 2016. Ecological effects of artificial light at night on wild plants. *J. Ecol.* 104, 611–620. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12551>
- Berberich, T., Kusano, T., 1997. Cycloheximide induces a subset of low temperature-inducible genes in maize. *Mol. Gen. Genet.* 254, 275–283. <https://doi.org/10.1007/s004380050416>
- Bergquist, S.Å.M., Gertsson, U.E., Nordmark, L.Y.G., Olsson, M.E., 2007. Ascorbic acid, carotenoids, and visual quality of baby spinach as affected by shade netting and postharvest storage. *J. Agric. Food Chem.* 55, 8444–8451. <https://doi.org/10.1021/jf070396z>
- Bernacchi, C.J., Singsaas, E.L., Pimentel, C., Portis, A.R., Long, S.P., 2001. Improved temperature response functions for models of Rubisco-limited photosynthesis. *Plant, Cell Environ.* 24, 253–259. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2001.00668.x>
- Berridge, M.J., Bootman, M.D., Lipp, P., 1998. Calcium a life and death signal. *Nature* 395, 645–648.
- Berry, D.C., Noy, N., 2009. All-trans-retinoic acid represses obesity and insulin resistance by activating both peroxisome proliferation-activated receptor/ and retinoic acid receptor. *Mol. Cell. Biol.* 29, 3286–3296. <https://doi.org/10.1128/mcb.01742-08>
- Bertorello, A.M., Aperia, A., Ivar Walaas, S., Nairn, A.C., Greengard, P., 1991. Phosphorylation of the catalytic subunit of Na⁺, K⁺-ATPase inhibits the activity of the enzyme. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 88, 11359–11362. <https://doi.org/10.1073/pnas.88.24.11359>
- Bettelheim, F.A., Brown, W.H., Campbell, M.K., Farrell, S.O., 2010. What are buffers?, in: *Introduction to Organic and Biochemistry*. pp. 156–159.
- Bhaskaram, P., 2002. Micronutrient malnutrition, infection, and immunity: an overview. *Nutr. Rev.* 60, S40–S45. <https://doi.org/10.1301/00296640260130722>
- Bhatia, S., Gangappa, S.N., Chattopadhyay, S., 2011. SHW1, a common regulator of abscisic acid (ABA) and light signaling pathways. *Plant Signal. Behav.* 3, 862–864. <https://doi.org/10.4161/psb.3.10.6038>
- Biddulph, O., Nakayama, F.S., Cory, R., 1961. Transpiration stream & ascension of calcium. *Plant Physiol.* 36, 429–436. <https://doi.org/10.1104/pp.36.4.429>
- Biehler, K., Fock, H., 1996. Evidence for the contribution of the mehlner-peroxidase reaction in dissipating excess electrons in drought-stressed wheat. *Plant Physiol* 112, 265–272.
- Biemond, H., Vos, J., 1992. Effects of nitrogen on the development and growth of the potato plant. 2. the partitioning of dry matter, nitrogen and nitrate. *Ann. Bot.* 70, 37–45. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a088437>
- Bieza, K., Lois, R., 2001. An Arabidopsis mutant tolerant to lethal ultraviolet-B levels shows constitutively elevated accumulation of flavonoids and other phenolics. *Plant Physiol.* 126, 1105–15.
- Binia, A., Jaeger, J., Hu, Y., Singh, A., Zimmermann, D., 2015. Daily potassium intake and sodium-to-potassium ratio in the reduction of blood pressure. *J. Hypertens.* 33, 1509–1520. <https://doi.org/10.1097/hjh.0000000000000611>
- Bisson, J.-F., Nejdi, A., Rozan, P., Hidalgo, S., Lalonde, R., Messaoudi, M., 2008. Effects of long-term administration of a cocoa polyphenolic extract (Acticoa powder) on cognitive performances in aged rats. *Br. J. Nutr.* 100, 94–101. <https://doi.org/10.1017/s0007114507886375>
- Bisson, M.A., Kiegle, E., Black, D., Kiyosawa, K., Gerber, N., 1995. The role of calcium in turgor regulation in *Chara longifolia*. *Plant. Cell Environ.* 18, 129–137. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1995.tb00346.x>

- Blair, R.M., Alcaniz, R., Harrell, A., 1983. Shade intensity influences the nutrient quality and digestibility of southern deer browse leaves. *J. Range Manag.* 36, 257–264. <https://doi.org/10.2307/3898177>
- Blevins, D.G., 1985. Role of Potassium in Protein Metabolism in Plants, in: *Potassium in Agriculture*. 413–424.
- Blevins, D. G., Hiatt, A. J., Lowe, R. H., 1974. The influence of nitrate and chloride uptake on expressed sap pH, organic acid synthesis, and potassium accumulation in higher plants. *Plant Physiology* 25, 82–87.
- Bliznikas, Z., Žukauskas, A., Samuoliene, G., Viršile, A., Brazaityte, A., Jankauskiene, J., Duchovskis, P., Novičkovas, A., 2012. Effect of supplementary pre-harvest LED lighting on the antioxidant and nutritional properties of green vegetables. *Acta Hortic.* 939, 85–91. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.939.10>
- Block, G., Norkus, E., Hudes, M., Mandel, S., Helzlsouer, K., 2001. Which plasma antioxidants are most related to fruit and vegetable consumption? *Am. J. Epidemiol.* 154, 1113–1118. <https://doi.org/10.1093/aje/154.12.1113>
- Bloem, M.W., 1995. Interdependence of vitamin A and iron: an important association for programmes of anaemia control. *Proc. Nutr. Soc.* 54, 501–508. <https://doi.org/10.1079/pns19950018>
- Blom-Zandstra, M., Lampe, J.E.M., 1985. The role of nitrate in the osmoregulation of lettuce (*Lactuca sativa* L.) grown at different light intensities. *J. Exp. Bot.* 36, 1043–1052.
- Blomhoff, R., Carlsen, M.H., Andersen, L.F., Jacobs, D.R., 2006. Health benefits of nuts: Potential role of antioxidants. *Br. J. Nutr.* 96, 52–60. <https://doi.org/10.1017/BJN20061864>
- Boeckx, T., Webster, R., Winters, A.L., Webb, K.J., Gay, A., Kingston-Smith, A.H., 2015. Polyphenol oxidase-mediated protection against oxidative stress is not associated with enhanced photosynthetic efficiency. *Ann. Bot.* 116, 529–540. <https://doi.org/10.1093/aob/mcv081>
- Boese, S.R., Huner, N.P.A., 1990. Effect of growth temperature and temperature shifts on spinach leaf morphology and photosynthesis. *Plant Physiol.* 94, 1830–1836. <https://doi.org/10.1104/pp.94.4.1830>
- Bohm, F., Edge, R., Land, E.J., McGarvey, D.J., Truscott, T.G., 1997. Carotenoids enhance vitamin E antioxidant efficiency. *J. Am. Chem. Soc.* 119, 621–622. <https://doi.org/10.1021/ja962512c>
- Böhme, M.H., 1993. Parameters for calculating nutrient solution for hydroponics, in: *8th International Congress on Soilless Culture*. pp. 85–96.
- Böhme, M.H., Grbic, N., Paschko, K., Pinker, I., 2015. Growth and internal quality of Vietnamese coriander (*Polygonum odoratum* Lour.) affected by additional lighting with blue, red and green LEDs. *Acta Hortic.* 1107, 113–120.
- Bohn, T., Walczyk, T., Leisibach, S., Hurrell, R.F., 2004. Variations in the content of phosphorus, nucleic acids and adenine in the leaves of some deciduous trees during the autumn. *J. Food Sci.* 69, 347–350.
- Bohren, C.F., Fraser, A.B., 2006. Colors of the sky. *Phys. Teach.* 23, 267–272. <https://doi.org/10.1119/1.2341808>
- Bolhar-Nordenkamp, H.R., Long, S.P., Lechner, U.E.G., Lechner, E.G., 1989. Die Bestimmung der Photosynthesekapazität über die Chlorophyllfluoreszenz als Maß für die Streßbelastung von Bäumen. *Phyt.* 29, 119–135.

- Bolland, M.J., Avenell, A., Baron, J.A., Grey, A., MacLennan, G.S., Gamble, G.D., Reid, I.R., 2010. Effect of calcium supplements on risk of myocardial infarction and cardiovascular events: Meta-analysis. *BMJ* 341, 1–9. <https://doi.org/10.1136/bmj.c3691>
- Bolland, M.J., Leung, W., Tai, V., Bastin, S., Gamble, G.D., Grey, A., Reid, I.R., 2015. Calcium intake and risk of fracture: Systematic review. *BMJ* 351, 1–14. <https://doi.org/10.1136/bmj.h4580>
- Bonet, M.L., Oliver, J., Pico, C., Felipe, F., Ribot, J., Cinti, S., Palou, A., 2000. Opposite effects of feeding a vitamin A-deficient diet and retinoic acid treatment on brown adipose tissue uncoupling protein 1 (UCP1), UCP2 and leptin expression. *J. Endocrinol.* 166, 511–517. <https://doi.org/10.1677/joe.0.1660511>
- Bonina, F., Lanza, M., Montenegro, L., Puglisi, C., Tomaino, A., Trombetta, D., Castelli, F., Saija, A., 1996. Flavonoids as potential protective agents against photo-oxidative skin damage. *Int. J. Pharm.* 145, 87–94. [https://doi.org/10.1016/S0378-5173\(96\)04728-X](https://doi.org/10.1016/S0378-5173(96)04728-X)
- Bonser, A.M., Lynch, J., Snapp, S., 1996. Effect of phosphorus deficiency on growth angle of basal roots in *Phaseolus vulgaris*. *New Phytol.* 132, 281–288. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1996.tb01847.x>
- Booij-James, I.S., Dube, S.K., Jansen, M.A.K., Edelman, M., Mattoo, A.K., 2002. Ultraviolet-B Radiation Impacts Light-Mediated Turnover of the Photosystem II Reaction Center Heterodimer in *Arabidopsis* Mutants Altered in Phenolic Metabolism. *Plant Physiol.* 124, 1275–1284. <https://doi.org/10.1104/pp.124.3.1275>
- Borevitz, J.O., Xia, Y., Blount, J., Dixon, R.A., Lamb, C., 2000. Activation tagging identifies a conserved MYB regulator of phenylpropanoid biosynthesis. *Plant Cell* 12, 2383–2394.
- Bose, J., Babourina, O., Shabala, S., Rengel, Z., 2013. Low-pH and aluminum resistance in *Arabidopsis* correlates with high cytosolic magnesium content and increased magnesium uptake by plant roots. *Plant Cell Physiol.* 54, 1093–1104. <https://doi.org/10.1093/pcp/pct064>
- Bosnir, D.B.J., Bevardi, M., Boskovic, A.G., Lasic, S.M.D., Krivohlavek, A., Racs, A., Mojosovic-Cuic, A., Trstenjak, N.U., 2017. Nitrate in leafy green vegetables and estimated intake. *African J. Tradit. Complement. Altern. Med.* 14, 31–41. <https://doi.org/10.21010/ajtcam.v14i3.4>
- Boss, P.K., Gardner, R.C., Janssen, B.J., Ross, G.S., 1995. An apple polyphenol oxidase cDNA is up-regulated in wounded tissues. *Plant Mol. Biol.* 27, 429–433. <https://doi.org/10.1007/BF00020197>
- Bothwell, T.H., Baynes, R.D., MacFarlane, B.J., MacPhail, A.P., 1989. Nutritional iron requirements and food iron absorption. *J. Intern. Med.* 226, 357–365.
- Bottomley, W., Smith, H., Galston, A.W., 1965. A Phytochrome mediated effect of light on the hydroxylation pattern of flavonoids in *Pisum sativum* var. Alaska. *Nature* 207, 1311–1312.
- Bou-Torrent, J., Toledo-Ortiz, G., Ortiz-Alcaide, M., Cifuentes-Esquivel, N., Halliday, K.J., Martinez-García, J.F., Rodriguez-Concepcion, M., 2015. Regulation of carotenoid biosynthesis by shade relies on specific subsets of antagonistic transcription factors and cofactors. *Plant Physiol.* 169, 1584–1594. <https://doi.org/10.1104/pp.15.00552>
- Bougoul, S., Brun, R., Jaffrin, A., 2000. Nitrate absorption-concentration of *Rosa hybrida* cv. Sweet promise grown in soilless culture. *Agronomie* 20, 165–174. <https://doi.org/10.1051/agro:2000117>
- Bouloumie, A., Marumo, T., Lafontan, M., Busse, R., 1999. Leptin induces oxidative stress in human endothelial cells. *FASEB J.* 13, 1231–1238.

- Bouly, J.P., Schleicher, E., Dionisio-Sese, M., Vandenbussche, F., Van Der Straeten, D., Bakrim, N., Meier, S., Batschauer, A., Galland, P., Bittl, R., Ahmad, M., 2007. Cryptochrome blue light photoreceptors are activated through interconversion of flavin redox states. *J. Biol. Chem.* 282, 9383–9391. <https://doi.org/10.1074/jbc.M609842200>
- Bowman, G.L., 2012. Ascorbic acid, cognitive function, and Alzheimer's disease: A current review and future direction. *BioFactors* 38, 114–122. <https://doi.org/10.1002/biof.1002>
- Bowman, J.C., Lenz, T.K., Hud, N. V., Williams, L.D., 2012. Cations in charge: magnesium ions in RNA folding and catalysis. *Curr. Opin. Struct. Biol.* 22, 262–272.
- Brand, J.J., Becker, D.W., 1984. Evidence for direct roles of calcium in photosynthesis. *J. Bioenerg. Biomembr.* 16, 239–249. <https://doi.org/10.1007/BF00744278>
- Brat, P., Georgé, S., Bellamy, A., Chaffaut, L. Du, Scalbert, A., Mennen, L., Arnault, N., Amiot, M.J., 2006. Daily polyphenol intake in france from fruit and vegetables. *J. Nutr.* 136, 2368–2373.
- Bratt, C.E., Arvidsson, P.O., Carlsson, M., Åkerlund, H.E., 1995. Regulation of violaxanthin de-epoxidase activity by pH and ascorbate concentration. *Photosynth. Res.* 45, 169–175. <https://doi.org/10.1007/BF00032588>
- Braunlin, E.A., Wahler, G.M., Swayze, C.R., Lucas, R. V., Fox, I.J., 1986. Myoglobin facilitated oxygen diffusion maintains mechanical function of mammalian cardiac muscle. *Cardiovasc. Res.* 20, 627–636. <https://doi.org/10.1093/cvr/20.9.627>
- Breteler, H., Nissen, P., 1982. Effect of exogenous and endogenous nitrate concentration on nitrate utilization by dwarf bean. *Plant Physiol.* 70, 754–759. <https://doi.org/10.1104/pp.70.3.754>
- Brevik, A., Andersen, L.F., Karlsen, A., Trygg, K.U., Blomhoff, R., Drevon, C.A., 2004. Six carotenoids in plasma used to assess recommended intake of fruits and vegetables in a controlled feeding study. *Eur. J. Clin. Nutr.* 58, 1166–1173. <https://doi.org/10.1038/sj.ejcn.1601945>
- Brewer, P.B., Koltai, H., Beveridge, C.A., 2013. Diverse roles of strigolactones in plant development. *Mol. Plant* 6, 18–28. <https://doi.org/10.1093/mp/sss130>
- Briat, J.F., Curie, C., Gaymard, F., 2007. Iron utilization and metabolism in plants. *Curr. Opin. Plant Biol.* 10, 276–282. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2007.04.003>
- Bridges, K.R., Hoffman, K.E., 1986. The effects of ascorbic acid on the intracellular metabolism of iron and ferritin. *J. Biol. Chem.*
- Broekmans, W.M.R., Klöpping-Ketelaars, I.A.A., Schuurman, C.R.W.C., Verhagen, H., van den Berg, H., Kok, F.J., van Poppel, G., 2000. Fruits and vegetables increase plasma carotenoids and vitamins and decrease homocysteine in humans. *J. Nutr.* 130, 1578–1583. <https://doi.org/10.1093/jn/130.6.1578>
- Brown, B.A., Jenkins, G.I., 2008. UV-B signaling pathways with different fluence-rate response profiles are distinguished in mature arabidopsis leaf tissue by requirement for UVR8, HY5, and HYH. *Plant Physiol.* 146, 576–588. <https://doi.org/10.1104/pp.107.108456>
- Brown, C.S., Schuerger, A.C., Sager, J.C., 1995. Growth and photomorphogenesis of pepper plants under red light-emitting diodes with supplemental blue or far-red lighting. *J. Am. Hortic. Sci.* 120, 808–813.
- Brown, D.E., Rashotte, A.M., Murphy, A.S., Normanly, J., Tague, B.W., Peer, W.A., Taiz, L., Muday, G.K., 2001. Flavonoids act as negative regulators of auxin transport in vivo in Arabidopsis. *Plant Physiol.* 126, 524–535. <https://doi.org/10.1104/pp.126.2.524>

- Brumagen, D.M., Hiatt, A.J., 1966. The relationship of oxalic acid to the translocation and utilization of calcium in *Nicotiana tabacum*. *Plant Soil* 14, 239–249.
- Bu, S.Y., Kang, M.H., Kim, E.J., Choi, M.K., 2012. Dietary intake ratios of calcium-to-phosphorus and sodium-to-potassium are associated with serum lipid levels in healthy Korean adults. *Prev. Nutr. Food Sci.* 17, 93–100. <https://doi.org/10.3746/pnf.2012.17.2.093>
- Bucher, H.C., Cook, R.J., Guyatt, G.H., Lang, J.D., Cook, D.J., Hatala, R., Hunt, D.L., 1996. Effects of dietary calcium supplementation on blood pressure: a meta-analysis of randomized controlled trials. *Jama* 275, 1016–1022.
- Bukhov, N.G., 2004. Dynamic Light Regulation of Photosynthesis (A Review). *Russ. J. Plant Physiol.* 51, 742–753.
- Bulley, S., Laing, W., 2016. The regulation of ascorbate biosynthesis. *Curr. Opin. Plant Biol.* 33, 15–22. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2016.04.010>
- Bünemann, E.K., Oberson, A., Liebisch, F., Keller, F., Annaheim, K.E., Huguenin-Elie, O., Frossard, E., 2012. Rapid microbial phosphorus immobilization dominates gross phosphorus fluxes in a grassland soil with low inorganic phosphorus availability. *Soil Biol. Biochem.* 51, 84–95. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.04.012>
- Burchard, P., Bilger, W., Weissenböck, G., 2000. Contribution of hydroxycinnamates and flavonoids to epidermal shielding of UV-A and UV-B radiation in developing rye primary leaves as assessed by ultraviolet-induced chlorophyll fluorescence measurements. *Plant, Cell Environ.* 23, 1373–1380. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2000.00633.x>
- Burger, J., Edwards, G.E., 1996. Photosynthetic efficiency, and photodamage by UV and visible radiation, in red versus green leafy vegetable varieties. *Plant Cell Physiol.* 37, 395–399. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.pcp.a028959>
- Burke, J.J., Gamble, P.E., Hatfield, J.L., Quisenberry, J.E., 1985. Plant morphological and biochemical responses to field water deficits. *Plant Physiol.* 79, 415–419. <https://doi.org/10.1104/pp.85.1.100>
- Burmeister, W.P., Cottaz, S., Rollin, P., Vasella, A., Henrissat, B., 2000. High resolution x-ray crystallography shows that ascorbate is a cofactor for myrosinase and substitutes for the function of the catalytic base. *J. Biol. Chem.* 275, 39385–39393. <https://doi.org/10.1074/jbc.M006796200>
- Burridge, J.C., Lockard, R.G., Acquaye, D.K., 1964. The levels of nitrogen, phosphorus, potassium, calcium and magnesium in the leaves of cacao (*Theobroma Cacao* L.) as affected by shade, fertilizer, irrigation, and season. *Ann. Bot.* 28, 401–418. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a083901>
- Busch, A., Hippler, M., 2011. The structure and function of eukaryotic photosystem I. *Biochim. Biophys. Acta - Bioenerg.* 1807, 864–877. <https://doi.org/10.1016/j.bbabi.2010.09.009>
- Buschmann, C., Meier, D., Kleudgen, H.K., Lichtenthaler, H.K., 1978. Regulation of chloroplast development by red and blue light. *Annu. Eur. Symp. Photomorphogenesis.* 195–198. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-022677-4.50017-4>
- Bush, L.P., 1969. Influence of certain cations on activity of succinyl coa synthetase from tobacco. *Plant Physiol.* 44, 347–350.
- Butterfield, D.A., Koppal, T., Howard, B., Subramaniam, R., Hall, N., Hensley, K., Yatin, S., Allen, K., Aksenov, M., Aksenova, M., Carney, J., 1998. Structural and functional changes in

- proteins induced by free radical-mediated oxidative stress and protective action of the antioxidants N-tert-Butyl- α -phenylnitron and. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 854, 448–462.
- Butterfield, D.A., Perluigi, M., Sultana, R., 2006. Oxidative stress in Alzheimer's disease brain: New insights from redox proteomics. *Eur. J. Pharmacol.* 545, 39–50. <https://doi.org/10.1016/J.EJPBAR.2006.06.026>
- Buttery, B.R., Stone, J.A., 1988. Some effects of nitrate and light intensity on soybean root growth and development. *Plant Soil* 106, 291–294. <https://doi.org/10.1007/BF02371228>
- Buttrose, M.S., 1968. Some effects of light intensity and temperature on dry weight and shoot growth of grape-vine. *Ann. Bot.* 32, 753–765. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a084247>
- Cadenas, E., Sies, H., 1984. Low-level chemiluminescence as an indicator of singlet molecular oxygen in biological systems. *Methods Enzymol.* 105, 221–231. [https://doi.org/10.1016/S0076-6879\(84\)05029-1](https://doi.org/10.1016/S0076-6879(84)05029-1)
- Cai, H., Chu, Q., Yuan, L., Liu, J., Chen, X., Chen, F., Mi, G., Zhang, F., 2012. Identification of quantitative trait loci for leaf area and chlorophyll content in maize (*Zea mays*) under low nitrogen and low phosphorus supply. *Mol. Breed.* 30, 251–266. <https://doi.org/10.1007/s11032-011-9615-5>
- Cakmak, I., 2005. The role of potassium in alleviating detrimental effects of abiotic stresses in plants. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 168, 521–530. <https://doi.org/10.1002/jpln.200420485>
- Cakmak, I., 1994. Activity of ascorbate-dependent H₂O₂-scavenging enzymes and leaf chlorosis are enhanced in magnesium- and potassium-deficient leaves, but not in phosphorus-deficient leaves. *J. Exp. Bot.* 45, 1259–1266. <https://doi.org/10.1093/jxb/45.9.1259>
- Cakmak, I., Kirkby, E.A., 2008. Role of magnesium in carbon partitioning and alleviating photooxidative damage. *Physiol. Plant.* 133, 692–704. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2007.01042.x>
- Cakmak, I., Marschner, H., 1992. Magnesium deficiency and high light intensity enhance activities of superoxide dismutase, ascorbate peroxidase, and glutathione reductase in bean leaves. *Plant Physiol.* 98, 1222–1227. <https://doi.org/10.1104/pp.98.4.1222>
- Cakmak, I., Yazici, A.M., 2010. Magnesium: a forgotten element in crop production. *Better Crop.* 94, 23–25.
- Calvo, M.S., Park, Y.K., 1996. Changing phosphorus content of the U.S. diet: potential for adverse effects on bone. *J. Nutr.* 126, 1168S–1180S. https://doi.org/10.1093/jn/126.suppl_4.1168s
- Calvo, M.S., Uribarri, J., 2013. Contributions to total phosphorus intake: all sources considered. *Semin. Dial.* 26, 54–61. <https://doi.org/10.1111/sdi.12042>
- Camejo, D., Rodríguez, P., Morales, M.A., Dell'Amico, J.M., Torrecillas, A., Alarcón, J.J., 2005. High temperature effects on photosynthetic activity of two tomato cultivars with different heat susceptibility. *J. Plant Physiol.* 162, 281–289. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2004.07.014>
- Campanha, M.M., Henrique, R., Santos, S., De, G.B., Emília, H., Martinez, P., Lages, S., Garcia, R., Santos, R.H.S., De Freitas, G.B., Martinez, H.E.P., Garcia, S.L.R., Finger, F.L., 2004. Growth and yield of coffee plants in agroforestry and monoculture systems in Minas Gerais, Brazil. *Agrofor. Syst.* 63, 75–82. <https://doi.org/10.1023/B:AGFO.0000049435.22512.2d>

- Campanoni, P., Nick, P., 2005. Auxin-dependent cell division and cell elongation. 1-naphthaleneacetic acid and 2,4-dichlorophenoxyacetic acid activate different pathways. *Plant Physiol.* 137, 939–948. <https://doi.org/10.1104/pp.104.053843.involvement>
- Campbell, C.A., Read, D.W., 1968. Influence of air temperature, light intensity and soil moisture on the growth, yield and some growth analysis characteristics of chinook wheat grown in the growth chamber. *Can. J. Plant Sci.* 48, 299–311.
- Campbell, D.R., Gross, M.D., Martini, M.C., Grandits, G.A., Slavin, J.L., Potter, J.D., 1994. Plasma carotenoids as biomarkers of vegetable and fruit intake. *Cancer Epidemiol. Biomarkers Prev.* 3, 493–500.
- Campbell, W.H., 1988. Nitrate reductase and its role in nitrate assimilation in plants. *Physiol. Plant.* 74, 214–219.
- Canas, J.A., Damaso, L., Altomare, A., Killen, K., Hossain, J., Balagopal, P., 2012. Insulin resistance and adiposity in relation to serum beta-carotene levels. *J. Pediatr.* 161, 58–64. <https://doi.org/10.1016/j.jpeds.2012.01.030>
- Cao, H., Ou, J., Chen, L., Zhang, Y., Szkudelski, T., Delmas, D., Daglia, M., Xiao, J., 2018. Dietary polyphenols and type 2 diabetes: human study and clinical trial. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 59, 1–9. <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1492900>
- Cappuccio, F.P., MacGregor, G.A., 1991. Does potassium supplementation lower blood pressure? A meta-analysis of published trials. *J. Hypertens.* 9, 465–473.
- Cárdenas-Navarro, R., Adamowicz, S., Gojon, A., Robin, P., 1999. Modelling nitrate influx in young tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) plants. *J. Exp. Bot.* 50, 625–635. <https://doi.org/10.1093/jxb/50.334.625>
- Cárdenas Navarro, R., Adamowicz, S., Robin, P., 1998. Modelling diurnal nitrate uptake in young tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) plants using a homeostatic model. *Acta Hort.* 456, 247–254.
- Carnevali, S., Petruzzelli, S., Longoni, B., Vanacore, R., Barale, R., Cipollini, M., Scatena, F., Paggiaro, P., Celi, A., Giuntini, C., 2015. Cigarette smoke extract induces oxidative stress and apoptosis in human lung fibroblasts. *Am. J. Physiol. Cell. Mol. Physiol.* 284, L955–L963. <https://doi.org/10.1152/ajplung.00466.2001>
- Carpita, N.C., Gibeaut, D.M., 1999. Structural models of primary cell walls in flowering plants: consistency of molecular structure with the physical properties of the walls during growth, 3, 1994.
- Carr, A.C., Frei, B., 1999. Toward new recommended dietary allowance for vitamin C based on antioxidant and health effects in humans. *The American journal of clinical nutrition.* 69, 1086–1107. In: Naidu, K.A. (2003) Vitamin C in human health and disease is still a mystery? An overre. *Nutr. J.* 2, 2–10. <https://doi.org/10.1093/ajcn/69.6.1086>
- Carrasco, G.A., Burrage, S.W., 1992. Diurnal fluctuations in nitrate uptake and nitrate accumulation in lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Acta Hort.* 339, 137–147.
- Carruth, B.R., Skinner, J.D., 2001. The role of dietary calcium and other nutrients in moderating body fat in preschool children. *Int. J. Obes.* 25, 559–566. <https://doi.org/10.1038/sj.ijo.0801562>
- Carter, R.C., Jacobson, J.L., Burden, M.J., Armony-Sivan, R., Dodge, N.C., Angelilli, M.L., Lozoff, B., Jacobson, S.W., 2010. Iron deficiency anemia and cognitive function in infancy. *Pediatrics* 126, e427–e434. <https://doi.org/10.1542/peds.2009-2097>

- Carvalho, S.D., Folta, K.M., 2016. Green light control of anthocyanin production in micro-greens. *Acta Hort.* 1134, 13–18. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1134.2>
- Casal, J.J., 2013. Photoreceptor signaling networks in plant responses to shade. *Annu. Rev. Plant Biol.* 64, 403–427. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-050312-120221>
- Cashman, K.D., 2002. Calcium intake, calcium bioavailability and bone health. *Br. J. Nutr.* 87, S169–S177. <https://doi.org/10.1079/bjn/2002534>
- Cashman, K.D., Flynn, A., 1999. Optimal nutrition: Calcium, magnesium and phosphorus. *Proc. Nutr. Soc.* 58, 477–487. <https://doi.org/10.1017/S0029665199000622>
- Casson, S.A., Franklin, K.A., Gray, J.E., Grierson, C.S., Whitelam, G.C., Hetherington, A.M., 2009. Phytochrome B and PIF4 regulate stomatal development in response to light quantity. *Curr. Biol.* 19, 229–234. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2008.12.046>
- Casson, S.A., Hetherington, A.M., 2014. Phytochrome B is required for light-mediated systemic control of stomatal development. *Curr. Biol.* 24, 1216–1221. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2014.03.074>
- Castillo, F.J., Greppin, H., 1988. Extracellular ascorbic acid and enzyme activities related to ascorbic acid metabolism in *Sedum album* L. leaves after ozone exposure. *Environ. Exp. Bot.* 28, 231–238. [https://doi.org/10.1016/0098-8472\(88\)90033-0](https://doi.org/10.1016/0098-8472(88)90033-0)
- Castillo, F.J., Heath, R.L., 1990. Ca²⁺ transport in membrane vesicles from pinto bean leaves and its alteration after ozone exposure. *Plant Physiol.* 94, 788–795. <https://doi.org/10.1104/pp.94.2.788>
- Catala, R., Medina, J., Salinas, J., 2011. Integration of low temperature and light signaling during cold acclimation response in *Arabidopsis*. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 108, 16475–16480. <https://doi.org/10.1073/pnas.1107161108>
- Cazzonelli, C.I., Pogson, B.J., 2010. Source to sink: regulation of carotenoid biosynthesis in plants. *Trends Plant Sci.* 15, 266–274. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2010.02.003>
- Céspedes, C.L., Avila, J.G., García, A.M., Becerra, J., Flores, C., Aqueveque, P., Bittner, M., Hoeneisen, M., Martinez, M., Silva, M., 2006. Antifungal and antibacterial activities of *Araucaria araucana* (Mol.) K. Koch heartwood lignans. *Zeitschrift für Naturforsch.* 61, 35–43.
- Ceunen, S., Werbrouck, S., Geuns, J.M.C., 2012. Stimulation of steviol glycoside accumulation in *Stevia rebaudiana* by red LED light. *J. Plant Physiol.* 169, 749–752. <https://doi.org/10.1016/J.JPLPH.2012.01.006>
- Chabot, B.F., Chabot, J.F., 1977. Effects of light and temperature on leaf anatomy and photosynthesis in *Fragaria vesca*. *Oecologia* 26, 363–377. <https://doi.org/10.1007/BF00345535>
- Chaki, M., Valderrama, R., Fernández-Ocaña, A.M., Carreras, A., López-Jaramillo, J., Luque, F., Palma, J.M., Pedrajas, J.R., Begara-Morales, J.C., Sánchez-Calvo, B., Gómez-Rodríguez, M. V., Corpas, F.J., Barroso, J.B., 2009. Protein targets of tyrosine nitration in sunflower (*Helianthus annuus* L.) hypocotyls. *J. Exp. Bot.* 60, 4221–4234. <https://doi.org/10.1093/jxb/erp263>
- Chalmers, D., Cell, S., Biol, D., Kyriacou, C.P., Huala, E., Oeller, P.W., Liscum, E., Han, I., Larsen, E., Briggs, W.R., 1997. *Arabidopsis* NPH1: a protein kinase with a putative redox-sensing domain. *Science* (80-.). 278, 2120–2123.
- Champigny, M.L., 1995. Integration of photosynthetic carbon and nitrogen metabolism in higher plants. *Photosynth. Res.* 46, 117–127. <https://doi.org/10.1007/BF00020422>
- Chan, G.M., McMurry, M., Westover, K., Engelbert-Fenton, K., Thomas, M.R., 1987. Effects

- of increased dietary calcium intake upon the calcium and bone mineral status of lactating adolescent and adult women. *Am. J. Clin. Nutr.* 46, 319–323. <https://doi.org/10.1093/ajcn/46.2.319>
- Chandler, P.M., Robertson, M., 1994. Gene expression regulated by abscisic acid and its relation to stress tolerance. *Annu. Rev. Plant Biol.* 45, 113–141. <https://doi.org/10.1146/annurev.pp.45.060194.000553>
- Chansiw, N., Chotinantakul, K., Srichairatanakool, S., 2019. Anti-inflammatory and antioxidant activities of the extracts from leaves and stems of *Polygonum odoratum* Lour. *Anti-inflamm. Antiallergy. Agents Med. Chem.* 18, 45–54. <https://doi.org/10.2174/1871523017666181109144548>
- Chansiw, N., Paradee, N., Chotinantakul, K., Srichairattanakool, S., 2018. Anti-hemolytic, antibacterial and anti-cancer activities of methanolic extracts from leaves and stems of *Polygonum odoratum*. *Asian Pac. J. Trop. Biomed.* 8, 580–585. <https://doi.org/10.4103/2221-1691.248094>
- Chaoui, A., Jarrar, B., El Ferjani, E., 2004. Effects of cadmium and copper on peroxidase, NADH oxidase and IAA oxidase activities in cell wall, soluble and microsomal membrane fractions of pea roots. *J. Plant Physiol.* 161, 1225–1234. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2004.02.002>
- Chapin, F.S., Kedrowski, R.A., 1983. Seasonal changes in nitrogen and phosphorus fractions and autumn retranslocation in evergreen and deciduous Taiga trees. *Ecology* 64, 376–391.
- Chatterjee, M., Sharma, P., Khurana, J.P., 2006. Cryptochrome 1 from *Brassica napus* is up-regulated by blue light and controls hypocotyl/stem growth and anthocyanin accumulation. *Plant Physiol.* 141, 61–74. <https://doi.org/10.1104/pp.105.076323>
- Chen, B.M., Wang, Z.H., Li, S.X., Wang, G.X., Song, H.X., Wang, X.N., 2004. Effects of nitrate supply on plant growth, nitrate accumulation, metabolic nitrate concentration and nitrate reductase activity in three leafy vegetables. *Plant Sci.* 167, 635–643. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2004.05.015>
- Chen, C.-Y., Milbury, P.E., Lapsley, K., Blumberg, J.B., 2018. Flavonoids from Almond Skins Are Bioavailable and Act Synergistically with Vitamins C and E to Enhance Hamster and Human LDL Resistance to Oxidation. *J. Nutr.* 135, 1366–1373. <https://doi.org/10.1093/jn/135.6.1366>
- Chen, C., Belanger, R.R., Benhamou, N., Paulitz, T.C., 2000. Defense enzymes induced in cucumber roots by treatment with plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) and *Pythium aphanidermatum*. *Physiol. Mol. Plant Pathol.* 56, 13–23. <https://doi.org/10.1006/pmpp.1999.0243>
- Chen, C., Xiao, Y.-G., Li, X., Ni, M., 2012. Light-regulated stomatal aperture in *Arabidopsis*. *Mol. Plant* 5, 566–572.
- Chen, H., Shen, Y., Tang, X., Yu, L., Wang, J., Guo, L., Zhang, Y., Zhang, H., Feng, S., Strickland, E., Zheng, N., Wang Deng, X., 2006. *Arabidopsis* CULLIN4 forms an E3 ubiquitin ligase with RBX1 and the CDD complex in mediating light control of development. *Plant Cell* 18, 1991–2004. <https://doi.org/10.1105/tpc.106.043224>
- Chen, J.J., Pal Yu, B., 1994. Alterations in mitochondrial membrane fluidity by lipid peroxidation products. *Free Rad. Biol. Med.* 17, 411–418.
- Chen, L., Yang, X., Jiao, H., Zhao, B., 2002. Tea catechins protect against lead-induced cytotoxicity, lipid peroxidation, and membrane fluidity in HepG2 cells. *Toxicol. Sci.* 69, 149–156. <https://doi.org/10.1093/toxsci/69.1.149>

- Chen, P., Hu, P., Xie, D., Qin, Y., Wang, F., Wang, H., 2010. Meta-analysis of vitamin D, calcium and the prevention of breast cancer. *Breast Cancer Res. Treat.* 121, 469–477. <https://doi.org/10.1007/s10549-009-0593-9>
- Chen, Q.M., Morrissey, S., Alpert, J.S., 2011. Oxidative stress and heart failure. *Am. J. Physiol. Circ. Physiol.* 301, 2181–2190. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801238-3.65249-2>
- Chen, S., Li, J., Wang, S., Hüttermann, A., Altman, A., 2001. Salt, nutrient uptake and transport, and ABA of *Populus euphratica*; a hybrid in response to increasing soil NaCl. *Trees* 15, 186–194. <https://doi.org/10.1007/s004680100091>
- Chen, S., Lory, N., Stauber, J., Hoecker, U., 2015. Photoreceptor Specificity in the Light-Induced and COP1-Mediated Rapid Degradation of the Repressor of Photomorphogenesis SPA2 in *Arabidopsis*. *PLoS Genet.* 11, 1–22. <https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1005516>
- Chen, X., Yao, Q., Gao, X., Jiang, C., Harberd, N.P., Fu, X., 2016. Shoot-to-root mobile transcription factor HY5 coordinates plant carbon and nitrogen acquisition. *Curr. Biol.* 26, 640–646. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2015.12.066>
- Chen, Z., Young, T.E., Ling, J., Chang, S.-C., Gallie, D.R., 2003. Increasing vitamin C content of plants through enhanced ascorbate recycling. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 100, 3525–3530. <https://doi.org/10.1073/pnas.0635176100>
- Cheng, C.-L., Acedo, G.N., Cristinsin, M., Conkling, M.A., 1992. Sucrose mimics the light induction of *Arabidopsis* nitrate reductase gene transcription. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 89, 1861–1864.
- Cheng, C.K.-C., Marsh, H. V., 1968. Gibberellic acid-promoted lignification and phenylalanine ammonia-lyase activity in a dwarf pea (*Pisum sativum*). *Plant Physiol.* 43, 1755–1759. <https://doi.org/10.1104/pp.43.11.1755>
- Cheong, Y.H., Pandey, G.K., Grant, J.J., Batistic, O., Li, L., Kim, B.G., Lee, S.C., Kudla, J., Luan, S., 2007. Two calcineurin B-like calcium sensors, interacting with protein kinase CIPK23, regulate leaf transpiration and root potassium uptake in *Arabidopsis*. *Plant J.* 52, 223–239. <https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2007.03236.x>
- Chernys, J.T., Zeevaart, J.A., 2000. Characterization of the 9-cis-epoxycarotenoid dioxygenase gene family and the regulation of abscisic acid biosynthesis in avocado. *Plant Physiol.* 124, 343–53.
- Chio, K.S., Tappel, A.L., 1969. Inactivation of Ribonuclease and Other Enzymes by Peroxidizing Lipids and by Malonaldehyde. *Biochemistry* 8, 2827–2832. <https://doi.org/10.1021/bi00835a020>
- Chiva-Blanch, G., Arranz, S., Lamuela-Raventos, R.M., Estruch, R., 2013. Effects of wine, alcohol and polyphenols on cardiovascular disease risk factors: Evidences from human studies. *Alcohol Alcohol.* 48, 270–277. <https://doi.org/10.1093/alcalc/agt007>
- Chiva-Blanch, G., Urpi-Sarda, M., Llorach, R., Rotches-Ribalta, M., Guilleñ, M., Casas, R., Arranz, S., Valderas-Martinez, P., Portoles, O., Corella, D., Tinahones, F., Lamuela-Raventos, R.M., Andres-Lacueva, C., Estruch, R., 2012. Differential effects of polyphenols and alcohol of red wine on the expression of adhesion molecules and inflammatory cytokines related to atherosclerosis: A randomized clinical trial. *Am. J. Clin. Nutr.* 95, 326–334. <https://doi.org/10.3945/ajcn.111.022889>
- Choi, Y., Harada, E., Wada, M., Tsuboi, H., Morita, Y., Kusano, T., Sano, H., 2001. Detoxification of cadmium in tobacco plants: formation and active excretion of crystals containing cadmium and calcium through trichomes. *Planta* 213, 45–50.

- Chou, P.-T., Khan, A.U., 1983. L-ascorbic acid quenching of singlet delta molecular oxygen in aqueous media: generalized antioxidant property of vitamin C. *Biochem. Biophys. Res. Commun.* 115, 932–937.
- Chouhan, S., Sharma, K., Zha, J., Guleria, S., Koffas, M.A.G., 2017. Recent advances in the recombinant biosynthesis of polyphenols. *Front. Microbiol.* 8, 1–16. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02259>
- Christie, J.M., Arvai, A.S., Baxter, K.J., Heilmann, M., Pratt, A.J., Hara, A.O., Kelly, S.M., Hothorn, M., Smith, B.O., Hitomi, K., Jenkins, G.I., Getzoff, E.D., 2012. Plant UVR8 photoreceptor senses UV-B by tryptophan-mediated disruption of cross-dimer salt bridges. *Science* (80-.). 335, 1492–1497.
- Christie, J.M., Jenkins, G.I., 1996. Distinct UV-B and UV-A/blue light signal transduction pathways induce chalcone synthase gene expression in *Arabidopsis* cells. *Plant Cell* 8, 1555–1567. <https://doi.org/10.2307/3870250>
- Christie, J.M., Salomon, M., Nozue, K., Wada, M., Briggs, W.R., 1999. LOV (light, oxygen, or voltage) domains of the blue-light photoreceptor phototropin (nph1): Binding sites for the chromophore flavin mononucleotide. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 96, 8779–8783. <https://doi.org/10.1073/pnas.96.15.8779>
- Chu, C.B., Toop, E.W., 1975. Effects of substrate potassium, substrate temperature and light intensity on growth and uptake of major cations by greenhouse tomato plants. *Can. J. Plant Sci.* 55, 121–126.
- Chun, O.K., Kim, D.O., Lee, C.Y., 2003. Superoxideradical scavenging activity of the major polyphenols in fresh plums. *J. Agric. Food Chem.* 51, 8067–8072. <https://doi.org/10.1021/jf034740d>
- Ciociu, M., Mirón, A., Mares, L., Tutunaru, D., Pohaci, C., Groza, M., Badescu, M., 2009. The effects of *Sambucus nigra* polyphenols on oxidative stress and metabolic disorders in experimental diabetes mellitus. *J. Physiol. Biochem.* 65, 297–304. <https://doi.org/10.1007/BF03180582>
- Clarkson, D., 1985. Factors affecting mineral nutrient acquisition by plants. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 36, 77–115. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.36.1.77>
- Clayton, S.N., Dunlap, W.P., 1987. Averaging correlation coefficients: Should fisher's z transformation be used? *J. Appl. Psychol.* 72, 146–148.
- Çobanoğlu, N., Özçelik, U., Göçmen, A., Kiper, N., Doğru, D., 2002. Antioxidant effect of β -carotene in cystic fibrosis and bronchiectasis: Clinical and laboratory parameters of a pilot study. *Acta Paediatr. Int. J. Paediatr.* 91, 793–798. <https://doi.org/10.1080/08035250213212>
- Cockshull, K.E., Graves, C.J., Cave, C.R.J., 1992. The influence of shading on yield of glass-house tomatoes. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* 67, 11–24.
- Cohen, P., 1985. The role of protein phosphorylation in the hormonal control of enzyme activity. *Eur. J. Biochem.* 151, 439–448. <https://doi.org/10.1111/j.1432-1033.1985.tb09121.x>
- Cominelli, E., Galbiati, M., Vavasseur, A., Conti, L., Sala, T., Vuylsteke, M., Leonhardt, N., Dellaporta, S.L., Tonelli, C., 2005. A guard-cell-specific MYB transcription factor regulates stomatal movements and plant drought tolerance. *Curr. Biol.* 15, 1196–1200. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2005.05.048>
- Congdon, E.L., Westerlund, A., Algarin, C., Peirano, P., Gregas, M., Lozoff, B., Nelson, C., 2012. Iron deficiency in infancy is associated with altered neural correlates of recognition

- memory at 10 years. *J. Pediatr.* 160, 1027–1033. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0178059>
- Conn, P.F., Schalch, W., Truscott, T.G., 1991. The singlet oxygen and carotenoid interaction. *J. Photochem. Photobiol. B Biol.* 11, 41–47.
- Constabel, C.P., Yip, L., Patton, J.J., Christopher, M.E., 2000. Polyphenol oxidase from hybrid poplar. Cloning and expression in response to wounding and herbivory. *Plant Physiol.* 124, 285–296. <https://doi.org/10.1104/pp.124.1.285>
- Cope, G.A., Deshaies, R.J., 2003. COP9 signalosome: A multifunctional regulator of SCF and other cullin-based ubiquitin ligases. *Cell* 114, 663–671. [https://doi.org/10.1016/S0092-8674\(03\)00722-0](https://doi.org/10.1016/S0092-8674(03)00722-0)
- Cope, K.R., Bugbee, B., 2013. Spectral effects of three types of white light-emitting diodes on plant growth and development: Absolute versus relative amounts of blue light. *HortScience* 48, 504–509.
- Cope, K.R., Snowden, M.C., Bugbee, B., 2014. Photobiological interactions of blue light and photosynthetic photon flux: Effects of monochromatic and broad-spectrum light sources. *Photochem. Photobiol.* 90, 574–584. <https://doi.org/10.1111/php.12233>
- Cordoba-Pedregosa, M., Gonzalez-Reyes, J.A., Canadillas, M., Navas, P., Cordoba, F., 1996. Role of apoplastic and cell-wall peroxidases on the stimulation of root elongation by ascorbate. *Plant Physiol.* 112, 1119–1125. <https://doi.org/10.1104/pp.112.3.1119>
- Cordoba, E., Salmi, M., León, P., 2009. Unravelling the regulatory mechanisms that modulate the MEP pathway in higher plants. *J. Exp. Bot.* 60, 2933–2943. <https://doi.org/10.1093/jxb/erp190>
- Corradi, M., Alinovi, R., Goldoni, M., Vettori, M.V., Folesani, G., Mozzoni, P., Cavazzini, S., Bergamaschi, E., Rossi, L., Mutti, A., 2002. Biomarkers of oxidative stress after controlled human exposure to ozone. *Toxicol. Lett.* 134, 219–225. [https://doi.org/10.1016/S0378-4274\(02\)00169-8](https://doi.org/10.1016/S0378-4274(02)00169-8)
- Corrê, W.J., 1983. Growth and morphogenesis of sun and shade plants iii. the combined effects of light intensity and nutrient supply. *Acta Bot. Neerl.* 32, 277–294. <https://doi.org/10.1111/j.1438-8677.1983.tb01713.x>
- Costa, J.M., Levizzani, V., Cattani, E., Melani, S., 2007. The retrieval of cloud top properties using VIS-IR channels, in: Levizzani, V., Bauer, P., Turk, F.J. (Eds.), *Measuring Precipitation from Space. Advances in Global Change Research*. Springer, Dordrecht, pp. 79–95. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5835-6_7
- Costa, L.C. do B., Pinto, J.E.B.P., Castro, E.M. de, Alves, E., Bertolucci, S.K.V., Rosal, L.F., 2010. Effects of coloured shade netting on the vegetative development and leaf structure of *Ocimum selloi*. *Bragantia* 69, 349–359.
- Costantino, L., Albasini, A., Rastelli, G., Benvenuti, S., 1992. Activity of polyphenolic crude extracts as scavengers of superoxide radicals and inhibitors of xanthine oxidase. *Planta Med.* 58, 342–344. <https://doi.org/10.1055/s-2006-961481>
- Cowan, J.A., 2002. Structural and catalytic chemistry of magnesium-dependent enzymes. *Bio-Metals* 15, 225–235. <https://doi.org/10.1023/A:1016022730880>
- Cox, B.D., Whichelow, M.J., Prevost, A.T., 2000. Seasonal consumption of salad vegetables and fresh fruit in relation to the development of cardiovascular disease and cancer. *Public Health Nutr.* 3, 19–29.
- Craig, D.S., Runkle, E.S., 2013. A moderate to high red to far-red light ratio from light-emitting

- diodes controls flowering of short-day plants. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 138, 167–172. <https://doi.org/10.21273/jashs.138.3.167>
- Crawford, N.M., 2007. Nitrate: nutrient and signal for plant growth. *Plant Cell* 7, 859–868. <https://doi.org/10.2307/3870042>
- Creasy, L.L., 1968. The increase in phenylalanine ammonia-lyase activity in strawberry leaf disks and its correlation with flavonoid synthesis. *Phytochemistry* 7, 441–446. [https://doi.org/10.1016/S0031-9422\(00\)90884-7](https://doi.org/10.1016/S0031-9422(00)90884-7)
- Croce, R., Van Amerongen, H., 2013. Light-harvesting in photosystem I. *Photosynth. Res.* 116, 153–166. <https://doi.org/10.1007/s11120-013-9838-x>
- Cross, C.E., Reznick, A.Z., Packer, L., Davts, P.A., Suzuki, Y.J., Halliwell, B., 1992. Oxidative damage to human plasma proteins by ozone. *Free Radic. Res.* 15, 347–352. <https://doi.org/10.3109/10715769209049150>
- Csepregi, K., Hideg, É., 2018. Phenolic Compound Diversity Explored in the Context of Photo-Oxidative Stress Protection. *Phytochem. Anal.* 29, 129–136. <https://doi.org/10.1002/pca.2720>
- Cummings, I.G., 2011. Red to far-red ratio correction in plant growth chambers. *Acta Hortic.* 907, 145–149.
- Cunningham, F.X., Pogson, B., Sun, Z., McDonald, K.A., DellaPenna, D., Gantt, E., 1996. Functional analysis of the beta and epsilon lycopene cyclase enzymes of *Arabidopsis* reveals a mechanism for control of cyclic carotenoid formation. *The Plant* 8, 1613–1626. <https://doi.org/10.1105/tpc.8.9.1613>
- Czeczuga, B., 1987. Carotenoid contents in leaves grown under various light intensities. *Biochem. Syst. Ecol.* 15, 523–527. [https://doi.org/10.1016/0305-1978\(87\)90100-1](https://doi.org/10.1016/0305-1978(87)90100-1)
- D’Elia, L., Barba, G., Cappuccio, F.P., Strazzullo, P., 2011. Potassium intake, stroke, and cardiovascular disease: A meta-analysis of prospective studies. *J. Am. Coll. Cardiol.* 57, 1210–1219. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2010.09.070>
- Da, J., Xie, X., Wolf, M., Disthabanchong, S., Wang, J., Zha, Y., Lv, J., Zhang, L., Wang, H., 2015. Serum phosphorus and progression of CKD and mortality: a meta-analysis of cohort studies. *Am. J. Kidney Dis.* 66, 258–265. <https://doi.org/10.1053/J.AJKD.2015.01.009>
- Dale, J.E., 1965. Leaf growth in *Phaseolus vulgaris*. *Ann. Bot.* 29, 293–308. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a083952>
- Damianaki, A., Bakogeorgou, E., Kampa, M., Notas, G., Hatzoglou, A., Panagiotou, S., Gemetzi, C., Kouroumalis, E., Martin, P.M., Castanas, E., 2000. Potent inhibitory action of red wine polyphenols on human breast cancer cells. *J. Cell. Biochem.* 78, 429–441. [https://doi.org/10.1002/1097-4644\(20000901\)78:3<429::AID-JCB8>3.0.CO;2-M](https://doi.org/10.1002/1097-4644(20000901)78:3<429::AID-JCB8>3.0.CO;2-M)
- Dapoigny, L., Tourdonnet, S. De, Roger-estrade, J., Dapoigny, L., Fleury, A., 2000. Effect of nitrogen nutrition on growth and nitrate accumulation in lettuce (*Lactuca sativa* L.), under various conditions of radiation and temperature. *Agronomy* 20, 843–855.
- Darko, E., Heydarizadeh, P., Schoefs, B., Sabzalian, M.R., 2014. Photosynthesis under artificial light: The shift in primary and secondary metabolism. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 369, 1–7. <https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0243>
- Darley-USmar, V.M., Hogg, N., O’Leary, V.J., Wilson, M.T., Moncada, S., 1992. The simultaneous generation of superoxide and nitric oxide can initiate lipid peroxidation in human low density lipoprotein. *Free Radic. Res. Commun.* 17, 9–20. <https://doi.org/10.3109/10715769209061085>

- Darvin, M.E., Haag, S., Meinke, M., Zastrow, L., Sterry, W., Lademann, J., 2010. Radical production by infrared A irradiation in human tissue. *Skin Pharmacol. Physiol.* 23, 40–46. <https://doi.org/10.1159/000257262>
- Dauchet, L., Amouyel, P., Hercberg, S., Dallongeville, J., 2005. Fruit and vegetable consumption and risk of stroke: A meta-analysis of cohort studies. *Neurology* 65, 1193–1197. <https://doi.org/10.1212/01.wnl.0000180600.09719.53>
- Daum, B., Nicastro, D., Austin, J., McIntosh, J.R., Kühlbrandt, W., 2010. Arrangement of photosystem II and ATP synthase in chloroplast membranes of spinach and pea. *Plant Cell* 22, 1299–1312. <https://doi.org/10.1105/tpc.109.071431>
- Davey, M.W., Montagu, M. Van, Inzé, D., Sanmartin, M., Kanellis, A., Smirnoff, N., Benzie, I.J., Strain, J.J., Favell, D., Fletcher, J., 2000. Review Plant L-ascorbic acid: chemistry, function, metabolism, bioavailability and effects of processing. *J. Sci. Food Agric.* 80, 825–860.
- David-Assael, O., Berezin, I., Shoshani-Knaani, N., Saul, H., Mizrachi-Dagri, T., Chen, J., Brook, E., Shaul, O., 2006. AtMHX is an auxin and ABA-regulated transporter whose expression pattern suggests a role in metal homeostasis in tissues with photosynthetic potential. *Funct. Plant Biol.* 33, 661–672.
- Davies, K.J., Maguire, J.J., Brooks, G.A., Dallman, P.R., Packer, L., 1982. Muscle mitochondrial bioenergetics, oxygen supply, and work capacity during dietary iron deficiency and repletion. *Am. J. Physiol. Metab.* 242, E418–E427. <https://doi.org/10.1152/ajpendo.1982.242.6.e418>
- Davies, R.E., 1963. A molecular theory of muscle contraction: Calcium-dependent contractions with hydrogen bond formation plus ATP-dependent extensions of part of the myosin-actin cross-bridges. *Nature* 199, 1068–1074. <https://doi.org/10.1038/1991068a0>
- Davis, P.A., Burns, C., 2016. Photobiology in protected horticulture. *Food Energy Secur.* 5, 223–238. <https://doi.org/10.1002/fes3.97>
- Davison, P.A., Hunter, C.N., Horton, P., 2002. Overexpression of β -carotene hydroxylase enhances stress tolerance in Arabidopsis. *Nature* 418, 203–206. <https://doi.org/10.1038/nature00861>
- Davuluri, G.R., Van Tuinen, A., Fraser, P.D., Manfredonia, A., Newman, R., Burgess, D., Brummell, D.A., King, S.R., Palys, J., Uhlig, J., Bramley, P.M., Pennings, H.M.J., Bowler, C., 2005. Fruit-specific RNA1-mediated suppression of DET1 enhances carotenoid and flavonoid content in tomatoes. *Nat. Biotechnol.* 23, 1–13. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0178059>
- Davuluri, G.R., Van Tuinen, A., Mustilli, A.C., Manfredonia, A., Newman, R., Burgess, D., Brummell, D.A., King, S.R., Palys, J., Uhlig, J., Pennings, H.M.J., Bowler, C., 2004. Manipulation of DET1 expression in tomato results in photomorphogenic phenotypes caused by post-transcriptional gene silencing. *Plant J.* 40, 344–354. <https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2004.02218.x>
- Dawson-Hughes, B., Harris, S.S., 2002. Calcium intake influences the association of protein intake with rates of bone loss in elderly men and women. *Am. J. Clin. Nutr.* 75, 773–779.
- Dawson-Hughes, B., Harris, S.S., Finneran, S., 1995. Calcium absorption on high and low calcium intakes in relation to vitamin D receptor genotype. *J. Clin. Endocrinol. Metab.* 80, 3657–3661.
- de Azevedo, B.C., Honorato, F.B., Martinez, E.Z., Bartolomeu, A.C.D., Carmona, F., Pereira, A.M.S., Taleb-Contini, S.H., Sales, D.S., 2014. *Eugenia punicifolia* (Kunth) DC. as an Adjuvant Treatment for Type-2 Diabetes Mellitus: A non-Controlled, Pilot Study . *Phyther. Res.*

- 1821, 1816–1821. <https://doi.org/10.1002/ptr.5206>
- De Gara, L., Tommasi, F., Liso, R., Arrigoni, O., 1991. Ascorbic acid utilization by prolyl hydroxylase in vivo. *Phytochemistry* 30, 1397–1399.
- De Iuliis, G.N., Newey, R.J., King, B. V., Aitken, R.J., 2009. Mobile phone radiation induces reactive oxygen species production and DNA damage in human spermatozoa in vitro. *PLoS One* 4, 1–9. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0006446>
- de la Haba, P., Agüera, E., Maldonado, J.M., 1990. Differential effects of ammonium and tungsten on nitrate and nitrite uptake and reduction by sunflower plants. *Plant Sci.* 70, 21–26.
- de Lucas, M., Prat, S., 2014. PIFs get BRright: PHYTOCHROME INTERACTING FACTORS as integrators of light and hormonal signals. *New Phytol.* 202, 1126–1141. <https://doi.org/10.1111/nph.12725>
- de Wit, M., Galvão, V.C., Fankhauser, C., 2016. Light-mediated hormonal regulation of plant growth and development. *Annu. Rev. Plant Biol.* 67, 513–537. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-043015-112252>
- DeBolt, S., Cook, D.R., Ford, C.M., 2006. L-Tartaric acid synthesis from vitamin C in higher plants. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 103, 5608–5613. <https://doi.org/10.1073/pnas.0510864103>
- Dechorgnat, J., Nguyen, C.T., Armengaud, P., Jossier, M., Diatloff, E., Filleur, S., Daniel-Vedele, F., 2011. From the soil to the seeds: The long journey of nitrate in plants. *J. Exp. Bot.* 62, 1349–1359. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq409>
- Deepa, N., Kaur, C., George, B., Singh, B., Kapoor, H.C., 2007. Antioxidant constituents in some sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) genotypes during maturity. *LWT - Food Sci. Technol.* 40, 121–129. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2005.09.016>
- Delaire, M., Maugé, J.-C., Beaujard, F., 2014. Evidence for a strong correlation between season-dependent nitrate and potassium uptake in two deciduous trees. *Trees* 28, 769–776.
- del Castillo, J., Engbaek, L., 1954. The nature of the neuromuscular block produced by magnesium. *J. Physiol.* 124, 370–384.
- Del Giudice, E.M., Santoro, N., Amato, A., Brienza, C., Calabrò, P., Wiegerinck, E.T., Cirillo, G., Tartaglione, N., Grandone, A., Swinkels, D.W., Perrone, L., 2009. Hepcidin in obese children as a potential mediator of the association between obesity and iron deficiency. *J. Clin. Endocrinol. Metab.* 94, 5102–5107. <https://doi.org/10.1210/jc.2009-1361>
- Del Gobbo, L.C., Imamura, F., Wu, J.H.Y., De Oliveira Otto, M.C., Chiuve, S.E., Mozaffarian, D., 2013. Circulating and dietary magnesium and risk of cardiovascular disease: A systematic review and meta-analysis of prospective studies. *Am. J. Clin. Nutr.* 98, 160–173. <https://doi.org/10.3945/ajcn.112.053132>
- Del Río, L.A., López-Huertas, E., 2016. ROS generation in peroxisomes and its role in cell signaling. *Plant Cell Physiol.* 57, 1364–1376. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcw076>
- del Río, L.A., Sansalio, L.M., Corpas, F.J., Palma, J.M., Barroso, J.B., 2006. Reactive oxygen species and reactive nitrogen species in peroxisomes. Production, scavenging, and role in cell signaling. *Plant Physiol.* 141, 330–335. <https://doi.org/10.1104/pp.106.078204>
- Delaunay, A., Pflieger, D., Barrault, M.B., Vinh, J., Toledano, M.B., 2002. A thiol peroxidase is an H₂O₂ receptor and redox-transducer in gene activation. *Cell* 111, 471–481.
- Delker, C., Sonntag, L., James, G.V., Janitza, P., Ibañez, C., Ziermann, H., Peterson, T., Denk, K., Mull, S., Ziegler, J., Davis, S.J., Schneeberger, K., Quint, M., 2014. The DET1-COP1-

- HY5 pathway constitutes a multipurpose signaling module regulating plant photomorphogenesis and thermomorphogenesis. *Cell Rep.* 9, 1983–1989. <https://doi.org/10.1016/j.celrep.2014.11.043>
- Delledonne, M., Zeier, J., Marocco, A., Lamb, C., 2001. Signal interactions between nitric oxide and reactive oxygen intermediates in the plant hypersensitive disease resistance response. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 98, 13454–13459. <https://doi.org/10.1073/pnas.231178298>
- Dello Ioio, R., Linhares, F.S., Scacchi, E., Casamitjana-Martinez, E., Heidstra, R., Costantino, P., Sabatini, S., 2007. Cytokinins determine Arabidopsis root-meristem size by controlling cell differentiation. *Curr. Biol.* 17, 678–682. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2007.02.047>
- Deruelle, F., Baron, B., 2008. Vitamin C: Is supplementation necessary for optimal health? *J. Altern. Complement. Med.* 14, 1291–1298. <https://doi.org/10.1089/acm.2008.0165>
- Desikan, R., Griffiths, R., Hancock, J., Neill, S., 2002a. A new role for an old enzyme: Nitrate reductase-mediated nitric oxide generation is required for abscisic acid-induced stomatal closure in *Arabidopsis thaliana*. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 99, 16314–16318.
- Desikan, R., Griffiths, R., Hancock, J., Neill, S., 2002b. A new role for an old enzyme Nitrate reductasemediated nitric oxide generation is required for.
- Despommier, D., 2009. The rise of vertical farms. *Sci. Am.* 301, 80–87.
- Deutsche Gesellschaft für Ernährung e.V., 2019. Referenzwerte für die Nährstoffzufuhr [WWW Document]. Referenzwerte. URL <https://www.dge.de/wissenschaft/referenzwerte/> (accessed 5.3.19).
- Devaraj, S., Vega-López, S., Kaul, N., Schönlau, F., Rohdewald, P., Jialal, I., 2002. Supplementation with a pine bark extract rich in polyphenols increases plasma antioxidant capacity and alters the plasma lipoprotein profile. *Lipids* 37, 931–934. <https://doi.org/10.1007/s11745-006-0982-3>
- Devau, N., Cadre, E. Le, Hinsinger, P., Jaillard, B., Gérard, F., 2009. Soil pH controls the environmental availability of phosphorus: Experimental and mechanistic modelling approaches. *Appl. Geochemistry* 24, 2163–2174. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2009.09.020>
- Dhalla, N.S., Temsah, R.M., Netticadan, T., 2000. Role of antioxidants and oxidative stress in cardiovascular diseases. *J. Hypertens.* 18, 655–673.
- Di Majo, D., Giammanco, M., La Guardia, M., Tripoli, E., Giammanco, S., Finotti, E., 2005. Flavanones in citrus fruit: structure-antioxidant activity relationships. *Food Res. Int.* 38, 1161–1166. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2005.05.001>
- Di Mascio, P., Kaiser, S., Sies, H., 1989. Lycopene as the most efficient biological carotenoid singlet oxygen quencher. *Arch. Biochem. Biophys.* 274, 532–538. [https://doi.org/10.1016/0003-9861\(89\)90467-0](https://doi.org/10.1016/0003-9861(89)90467-0)
- Díaz-González, M., Rocasalbas, G., Francesko, A., Tourino, S., Torres, J.L., Tzanov, T., 2012. Inhibition of deleterious chronic wound enzymes with plant polyphenols. *Biocatal. Biotransformation* 30, 102–110. <https://doi.org/10.3109/10242422.2012.646676>
- Díaz-Pérez, J.C., 2013. Bell pepper (*Capsicum annum* L.) crop as affected by Shade level: Microenvironment, plant growth, leaf gas exchange, and leaf mineral nutrient concentration. *HortScience* 48, 175–182.
- Díaz-Pérez, J.C., St. John, K., 2019. Bell pepper (*Capsicum annum* L.) under colored shade nets: plant growth and physiological responses. *HortScience* 54, 1795–1801. <https://doi.org/10.21273/hortsci14233-19>

- Dieleman, J.A., Meinen, E., 2007. Interacting effects of temperature integration and light intensity on growth and development of single-stemmed cut rose plants. *Sci. Hortic. (Amsterdam)*. 113, 182–187. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2007.03.004>
- Diem, B., Godbold, D.L., 1993. Potassium, calcium and magnesium antagonism in clones of *Populus trichocarpa*. *Plant Soil* 155–156, 411–414. <https://doi.org/10.1007/BF00025070>
- Dietzel, L., Bräutigam, K., Steiner, S., Schöffler, K., Lepetit, B., Grimm, B., Schöttler, M.A., Pfannschmidt, T., 2011. Photosystem II supercomplex remodeling serves as an entry mechanism for state transitions in *Arabidopsis*. *Plant Cell* 23, 2964–2977. <https://doi.org/10.1105/tpc.111.087049>
- Dietzel, L., Pfannschmidt, T., 2008. Photosynthetic acclimation to light gradients in plant stands comes out of shade. *Plant Signal. Behav.* 3, 1116–1118. <https://doi.org/10.4161/psb.3.12.7038>
- Dimassi-Theriou, K., Bosabalidis, A.M., 1997. Effects of light, magnesium and sucrose on leaf anatomy, photosynthesis, starch and total sugar accumulation, in kiwifruit cultured in vitro. *Plant Cell. Tissue Organ Cult.* 47, 127–134. <https://doi.org/10.1007/bf02318948>
- Ding, Y., Luo, W., Xu, G., 2006. Characterisation of magnesium nutrition and interaction of magnesium and potassium in rice. *Ann. Appl. Biol.* 149, 111–123. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2006.00080.x>
- Diretto, G., Welsch, R., Tavazza, R., Mourgues, F., Pizzichini, D., Beyer, P., Giuliano, G., 2007. Silencing of beta-carotene hydroxylase increases total carotenoid and beta-carotene levels in potato tubers. *BMC Plant Biol.* 7, 1–8. <https://doi.org/10.1186/1471-2229-7-11>
- Dixon, R.A., Paiva, N.L., 1995. Stress-induced phenylpropanoid metabolism. *Plant Cell* 7, 1085–1097. <https://doi.org/10.2307/3870059>
- Doberer, E., 2008. Kalium: Was man über Kalium wissen sollte. *Aktuel. Ernährungsmed.* 33, 82–87.
- Dobisova, T., Hrdinova, V., Cuesta, C., Michlickova, S., Urbankova, I., Hejatkova, R., Zadnikova, P., Pernisova, M., Benkova, E., Hejatkova, J., 2017. Light controls cytokinin signaling via transcriptional regulation of constitutively active sensor histidine kinase CKII. *Plant Physiol.* 174, 387–404. <https://doi.org/10.1104/pp.16.01964>
- Doets, E.L., De Wit, L.S., Dhonukshe-Rutten, R.A.M., Cavelaars, A.E.J.M., Raats, M.M., Timotijevic, L., Brzozowska, A., Wijnhoven, T.M.A., Pavlovic, M., Totland, T.H., Andersen, L.F., Ruprich, J., Pijls, L.T.J., Ashwell, M., Lambert, J.P., Van 't Veer, P., De Groot, L.C.P.G.M., 2008. Current micronutrient recommendations in Europe: Towards understanding their differences and similarities. *Eur. J. Nutr.* 47, 17–40. <https://doi.org/10.1007/s00394-008-1003-5>
- Dong, J., Tang, D., Gao, Z., Yu, R., Li, K., He, H., Terzaghi, W., Deng, X.W., Chen, H., 2014. *Arabidopsis* DE-ETIOLATED1 represses photomorphogenesis by positively regulating phytochrome-interacting factors in the dark. *Plant Cell* 26, 3630–3645. <https://doi.org/10.1105/tpc.114.130666>
- Dorenstouter, H., Pieters, G.A., Findenegg, G.R., 1985. Distribution of magnesium between chlorophyll and other photosynthetic functions in magnesium deficient “sun”; and “shade”; leaves of poplar. *J. Plant Nutr.* 8, 1089–1101.
- Dowdle, J., Ishikawa, T., Gatzek, S., Rolinski, S., Smirnoff, N., 2007. Two genes in *Arabidopsis thaliana* encoding GDP-L-galactose phosphorylase are required for ascorbate biosynthesis and seedling viability. *Plant J.* 52, 673–689. <https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2007.03266.x>

- Drake, B.G., Raschke, K., Salisbury, F.B., 1970. Temperature and transpiration resistances of *Xanthium* leaves as affected by air temperature, humidity, and wind speed. *Plant Physiol.* 46, 324–330. <https://doi.org/10.1104/pp.46.2.324>
- Draper, D.E., Misra, V.K., 1998. On the role of magnesium ions in RNA stability. *Biopolymers* 48, 113–135. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0282\(1998\)48:2<113::AID-BIP3>3.0.CO;2-Y](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0282(1998)48:2<113::AID-BIP3>3.0.CO;2-Y)
- Draznin, B., 1988. Intracellular calcium, insulin secretion, and action. *Am. J. Med.* 85, 44–58.
- Dreosti, I.E., 1996. Bioactive ingredients: antioxidants and polyphenols in tea. *Nutr. Rev.* 54, S51–S58. <https://doi.org/10.1111/j.1753-4887.1996.tb03819.x>
- Drew, M.C., Saker, L.R., 1978. Nutrient supply and the growth of the seminal root system in barley. *J. Exp. Bot.* 29, 435–451. <https://doi.org/10.1093/jxb/29.2.435>
- Dreyer, I., Uozumi, N., 2011. Potassium channels in plant cells. *FEBS J.* 278, 4293–4303. <https://doi.org/10.1111/j.1742-4658.2011.08371.x>
- Du, H., Wang, N., Cui, F., Li, X., Xiao, J., Xiong, L., 2010. Characterization of the γ -Carotene Hydroxylase Gene DSM2 Conferring Drought and Oxidative Stress Resistance by Increasing Xanthophylls and Abscissic Acid Synthesis in Rice. *Plant Physiol.* 154, 1304–1318. <https://doi.org/10.1104/pp.110.163741>
- Du, J., Cullen, J.J., Buettner, G.R., 2012. Ascorbic acid: Chemistry, biology and the treatment of cancer. *Biochim. Biophys. Acta* 1826, 443–457. <https://doi.org/10.1038/mp.2011.182>
- Du, Y., Guo, H., Lou, H., 2007. Grape seed polyphenols protect cardiac cells from apoptosis via induction of endogenous antioxidant enzymes. *J. Agric. Food Chem.* 55, 1695–1701. <https://doi.org/10.1021/jf063071b>
- Duchnowicz, P., Bors, M., Podsedek, A., Koter-Michalak, M., Broncel, M., 2012. Effect of polyphenols extracts from Brassica vegetables on erythrocyte membranes (in vitro study). *Environ. Toxicol. Pharmacol.* 34, 783–790. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2012.09.008>
- Duckworth, J., Warnock, G.M., 1942. The magnesium requirements of man in relation to calcium requirements, with observations on the adequacy of diets in common use. *Nutr. Abstr. Rev.* 12, 167–183.
- Duek, P.D., Elmer, M. V., van Oosten, V.R., Fankhauser, C., 2004. The degradation of HFR1, a putative bHLH class transcription factor involved in light signaling, is regulated by phosphorylation and requires COP1. *Curr. Biol.* 14, 2296–2301. <https://doi.org/10.1016/j>
- Duek, P.D., Fankhauser, C., 2003. HFR1, a putative bHLH transcription factor, mediates both phytochrome A and cryptochrome signalling. *Plant J.* 34, 827–836. <https://doi.org/10.1046/j.1365-313X.2003.01770.x>
- Duff, S.M.G., Moorhead, G.B.G., Lefebvre, D.D., Plaxton, W.C., 1989. Phosphate starvation inducible 'bypasses' of adenylate and phosphate dependent glycolytic enzymes in *Brassica nigra* suspension cells. *Plant Physiol.* 90, 1275–1278. <https://doi.org/10.1104/pp.90.4.1275>
- Dumbravă, D., Moldovan, C., Raba, D.-N., Popa, M.-V., 2012. Vitamin C, chlorophylls, carotenoids and xanthophylls content in some basil (*Ocimum basilicum* L.) and rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.) leaves extracts. *J. Agroaliment. Process. Technol.* 18, 253–258.
- Dunlop, B.W., Nemeroff, C.B., 2007. The role of dopamine in the pathophysiology of depression. *Arch. Gen. Psychiatry* 64, 327–337. <https://doi.org/10.1001/archpsyc.64.3.327>
- Dutta Gupta, S., Karmakar, A., 2017. Machine vision based evaluation of impact of light emitting diodes (LEDs) on shoot regeneration and the effect of spectral quality on phenolic content

- and antioxidant capacity in *Swertia chirata*. *J. Photochem. Photobiol. B Biol.* 174, 162–172. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2017.07.029>
- Dyck, J.R.B., Kudo, N., Barr, A.J., Davies, S.P., Hardie, D.G., Lopaschuk, G.D., 1999. Phosphorylation control of cardiac acetyl-CoA carboxylase by cAMP- dependent protein kinase and 5'-AMP activated protein kinase. *Eur. J. Biochem.* 262, 184–190. <https://doi.org/10.1046/j.1432-1327.1999.00371.x>
- Dyckner, T., Wester, P.O., 1983. Effect of magnesium on blood pressure. *Br. Med. J.* 286, 1847–1849.
- Dykhuizen, R.S., Fraser, A., Duncan, C., Golden, M., Benjamin, N., Leifert, C., 1999. Antimicrobial effect of acidified nitrite on gut pathogens: the importance of dietary nitrate in host defence. *Manag. Risks Nitrates to Humans Environ.* 295–316. <https://doi.org/10.1533/9781845693206.295>
- Eberhard, S., Finazzi, G., Wollman, F.-A., 2008. The dynamics of photosynthesis. *Annu. Rev. Genet.* 42, 463–515. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1934.tb06793.x>
- Ebisawa, M., Shoji, K., Kato, M., Shimomura, K., Goto, F., Yoshihara, T., 2008. Supplementary ultraviolet radiation B together with blue light at night increased quercetin content and flavonol synthase gene expression in leaf lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Environ. Control Biol.* 46, 1–11. <https://doi.org/10.2525/ecb.46.1>
- Edreva, A., 2005. The importance of non-photosynthetic pigments and cinnamic acid derivatives in photoprotection. *Agric. Ecosyst. Environ.* 106, 135–146. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2004.10.002>
- EFSA, 2017a. Dietary Reference Values for nutrients Summary report. <https://doi.org/10.2903/sp.efsa.2017.e15121>
- EFSA, 2017b. Lebensmitteln zugesetzte Nitrite und Nitrate.
- EFSA, 2010. Draft Scientific Opinion on Acrylamide in Food. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.20YY.NNNN.Available>
- Egli, I., Davidsson, L., Juillerat, M.A., Barclay, D., Hurrell, R.F., 2002. The influence of soaking and germination on the phytase activity and phytic acid content of grains and seeds potentially useful for complementary feeding. *J. Food Sci.* 67, 3484–3488. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2002.tb09609.x>
- Eichenberg, K., Bäurle, I., Paulo, N., Sharrock, R.A., Rüdiger, W., Schäfer, E., 2000. Arabidopsis phytochromes C and E have different spectral characteristics from those of phytochromes A and B. *FEBS Lett.* 470, 107–112. [https://doi.org/10.1016/S0014-5793\(00\)01301-6](https://doi.org/10.1016/S0014-5793(00)01301-6)
- Eipper, B.A., Mains, R.E., Glembotski, C.C., 1983. Identification in pituitary tissue of a peptide alpha-amidation activity that acts on glycine-extended peptides and requires molecular oxygen, copper, and ascorbic acid. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 80, 5144–5148.
- El-Gizawy, A.M., Gomaa, H.M., El-Habbasha, K.M., Mohamed, S.S., 1992. Effect of different shading levels on tomato plants 1. Growth, flowering and chemical composition. *Acta Hort.* 323, 341–348. <https://doi.org/10.17660/actahortic.1993.323.31>
- El-Sharkawy, M.A., Cock, J.H., Del Pilar Hernandez, A., 1985. Stomatal response to air humidity and its relation to stomatal density in a wide range of warm climate species. *Photosynth. Res.* 7, 137–149. <https://doi.org/10.1007/BF00037004>
- Elin, R.J., 1994. Magnesium: The fifth but forgotten electrolyte. *Am. J. Clin. Pathol.* 102, 616–622. <https://doi.org/10.1093/ajcp/102.5.616>

- Elliott, P., Kesteloot, H., Appel, L.J., Dyer, A.R., Ueshima, H., Chan, Q., Brown, I.J., Zhao, L., Stamler, J., 2008. Dietary phosphorus and blood pressure: International study of macro- and micro-nutrients and blood pressure. *Hypertension* 51, 669–675. <https://doi.org/10.1161/HYPERTENSIONAHA.107.103747>
- Ellsworth, D.S., Crous, K.Y., Lambers, H., Cooke, J., 2015. Phosphorus recycling in photorespiration maintains high photosynthetic capacity in woody species. *Plant, Cell Environ.* 38, 1142–1156. <https://doi.org/10.1111/pce.12468>
- Enfissi, E.M.A., Fraser, P.D., Lois, L.M., Boronat, A., Schuch, W., Bramley, P.M., 2005. Metabolic engineering of the mevalonate and non-mevalonate isopentenyl diphosphate-forming pathways for the production of health-promoting isoprenoids in tomato. *Plant Biotechnol. J.* 3, 17–27. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7652.2004.00091.x>
- Engelmann, K., Funk, R.H., 2009. Kataraktextraktion und Blaublicht - Wirkung auf die Netzhaut. *Klin. Monbl. Augenheilkd.* 226, 829–838. <https://doi.org/10.1055/s-0028-1109529>
- Engelsma, G., 1974. On the mechanism of the changes in phenylalanine ammonia-lyase activity induced by ultraviolet and blue light in Gherkin hypocotyls. *Plant Physiol.* 54, 702–705.
- Engelsma, G., 1968. Photoinduction of phenylalanine deaminase in gherkin seedlings - III. Effects of excision and irradiation on enzyme development in hypocotyl segments. *Planta* 82, 355–368. <https://doi.org/10.1007/BF00387559>
- Engelsma, G., 1967. Photoinduction of phenylalanine deaminase in gherkin seedlings - II. Effect of red and far-red light. *Planta* 77, 49–57. <https://doi.org/10.1007/BF00387559>
- Epe, B., Mützel, P., Adam, W., 1988. DNA damage by oxygen radicals and excited state species: A comparative study using enzymatic probes in vitro. *Chem. Biol. Interact.* 67, 149–165. [https://doi.org/10.1016/0009-2797\(88\)90094-4](https://doi.org/10.1016/0009-2797(88)90094-4)
- Erlandson, A.G.I., Jensén, P., 1989. Influence of low temperature on regulation of Rb⁺ and Ca²⁺ influx in roots of winter wheat. *Physiol. Plant.* 75, 114–120. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1989.tb02072.x>
- Erlejman, A.G., Verstraeten, S. V., Fraga, C.G., Oteiza, P.I., 2004. The interaction of flavonoids with membranes: Potential determinant of flavonoid antioxidant effects. *Free Radic. Res.* 38, 1311–1320. <https://doi.org/10.1080/10715760400016105>
- Ermak, G., Davies, K.J.A., 2001. Calcium and oxidative stress: from cell signaling to cell death. *Mol. Immunol.* 38, 713–721.
- Eskioçak, S., Dundar, C., Basoglu, T., Altaner, S., 2005. The effects of taking chronic nitrate by drinking water on thyroid functions and morphology. *Clin. Exp. Med.* 5, 66–71. <https://doi.org/10.1007/s10238-005-0068-1>
- Eskling, M., Åkerlund, H.E., 1998. Changes in the quantities of violaxanthin de-epoxidase, xanthophylls and ascorbate in spinach upon shift from low to high light. *Photosynth. Res.* 57, 41–50. <https://doi.org/10.1023/A:1006015630167>
- Esmon, C.A., Tinsley, A.G., Ljung, K., Sandberg, G., Hearne, L.B., Liscum, E., 2006. A gradient of auxin and auxin-dependent transcription precedes tropic growth responses. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 103, 236–241. <https://doi.org/10.1073/pnas.0507127103>
- Espí, E., Salmerón, A., Fontecha, A., García, Y., Real, A.I., 2006. Plastic Films for Agricultural Applications. *J. Plast. Film Sheeting* 22, 85–102. <https://doi.org/10.1177/8756087906064220>
- Estévez, J.M., Cantero, A., Reindl, A., Reichler, S., León, P., 2001. 1-Deoxy-D-xylulose-5-phosphate synthase, a limiting enzyme for plastidic isoprenoid biosynthesis in plants. *J. Biol. Chem.* 276, 22901–22909. <https://doi.org/10.1074/jbc.M100854200>

- Europäische Kommission, 2005. Verordnung (EG) Nr. 466/2001 der Kommission vom 8. März 2001 zur Festsetzung der Höchstgehalte für bestimmte Kontaminanten in Lebensmitteln.
- European Food Safety Authority, 2015. Scientific opinion on dietary reference values for vitamin A. *EFSA J.* 13, 1–84. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2015.4254>
- Evans, J., 1987. The dependence of quantum yield on wavelength and growth irradiance. *Aust. J. Plant Physiol.* 14, 69–79. <https://doi.org/10.1071/PP9870069>
- Evans, J.R., 1999. Leaf anatomy enables more equal access to light and CO₂ between chloroplasts. *New Phytol.* 143, 93–104. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.1999.00440.x>
- Evans, N.H., McAinsh, M.R., Hetherington, A.M., Knight, M.R., 2005. ROS perception in *Arabidopsis thaliana*: The ozone-induced calcium response. *Plant J.* 41, 615–626. <https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2004.02325.x>
- Everett, S.A., Dennis, M.F., Patel, K.B., Maddix, S., Kundu, S.C., Willson, R.L., 1996. Scavenging of nitrogen dioxide, thiyl, and sulfonyl free radicals by the nutritional antioxidant β -carotene. *J. Biol. Chem.* 271, 3988–3994. <https://doi.org/10.1074/jbc.271.8.3988>
- Everette, J.D., Bryant, Q.M., Green, A.M., Abbey, Y.A., Wangila, G.W., Walker, R.B., 2010. Thorough study of reactivity of various compound classes toward the folin-Ciocalteu reagent. *J. Agric. Food Chem.* 58, 8139–8144. <https://doi.org/10.1021/jf1005935>
- Facella, P., Lopez, L., Carbone, F., Galbraith, D.W., Giuliano, G., Perrotta, G., 2008. Diurnal and circadian rhythms in the tomato transcriptome and their modulation by cryptochrome photoreceptors. *PLoS One* 3, 1–15. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0002798>
- Fairchild, C.D., Schumaker, M.A., Quail, P.H., 2000. HFR1 encodes an atypical bHLH protein that acts in phytochrome A signal transduction. *Genes Dev.* 14, 2377–2391. <https://doi.org/10.1101/gad.82800.vides>
- Falbel, T.G., Staehelin, L.A., Adams, W.W., 1994. Analysis of xanthophyll cycle carotenoids and chlorophyll fluorescence in light intensity-dependent chlorophyll-deficient mutants of wheat and barley. *Photosynth. Res.* 42, 191–202. <https://doi.org/10.1007/BF00018262>
- Fan, X.-X., Xu, Z.-G., Liu, X.-Y., Tang, C.-M., Wang, L.-W., Han, X., 2013. Effects of light intensity on the growth and leaf development of young tomato plants grown under a combination of red and blue light. *Sci. Hortic. (Amsterdam)*. 153, 50–55.
- FAO/WHO, 2004a. Vitamin and mineral requirements in human nutrition. Second edition. Jt. FAO/WHO Expert Consult. *Hum. Vitam. Miner. Requis.* https://doi.org/92_4_154612_3
- FAO/WHO, 2004b. Vitamin and mineral requirements in human nutrition. Second edition. Jt. FAO/WHO Expert Consult. *Hum. Vitam. Miner. Requis.* 1–362. https://doi.org/92_4_154612_3
- FAO/WHO, 2001. Human Vitamin and Mineral Requirements.
- FAO, 1988. Vitamin A, in: Requirements of Vitamin A, Iron, Folate and Vitamin B12. pp. 16–32.
- Fatemi, S., Ryzen, E., Flores, J., Endres, D.B., Rude, R.K., 1991. Effect of experimental human magnesium depletion on parathyroid hormone secretion and 1, 25-dihydroxyvitamin D metabolism. *J. Clin. Endocrinol. Metab.* 73, 1067–1072. <https://doi.org/10.1210/jcem-73-5-1067>
- Faulds, C.B., Williams, G., 1999. The role of hydroxycinnamates in the plant cell. *J. Sci. Food Agric.* 79, 393–395.
- Favela-Hernández, J.M.J., García, A., Garza-González, E., Rivas-Galindo, V.M., Camacho-Corona, M.R., 2012. Antibacterial and antimycobacterial lignans and flavonoids from *Larrea*

- tridentata. *Phyther. Res.* 26, 1957–1960. <https://doi.org/10.1002/ptr.4660>
- Federico, A., Morgillo, F., Tuccillo, C., Ciardiello, F., Loguercio, C., 2007. Chronic inflammation and oxidative stress in human carcinogenesis. *Int. J. Cancer* 121, 2381–2386. <https://doi.org/10.1002/ijc.23192>
- Feild, T.S., Lee, D.W., Holbrook, N.M., 2001. Why leaves turn red in autumn. The role of anthocyanins in senescing leaves of red-osier dogwood. *Plant Physiol.* 127, 566–574. <https://doi.org/10.1104/pp.010063.566>
- Felipe, F., Bonet, M.L., Ribot, J., Palou, A., 2004. Modulation of resistin expression by retinoic acid and vitamin A status. *Diabetes* 53, 882–889. <https://doi.org/10.2337/diabetes.53.4.882>
- Felipe, F., Mercader, J., Ribot, J., Palou, A., Bonet, M.L., 2005. Effects of retinoic acid administration and dietary vitamin A supplementation on leptin expression in mice: Lack of correlation with changes of adipose tissue mass and food intake. *Biochim. Biophys. Acta - Mol. Basis Dis.* 1740, 258–265. <https://doi.org/10.1016/j.bbadis.2004.11.014>
- Fenech, M., Amaya, I., Valpuesta, V., Botella, M.A., 2019. Vitamin C content in fruits: Biosynthesis and regulation. *Front. Plant Sci.* 9, 1–21. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.02006>
- Feng, C., Andreasson, E., Maslak, A., Mock, H.P., Mattsson, O., Mundy, J., 2004. Arabidopsis MYB68 in development and responses to environmental cues. *Plant Sci.* 167, 1099–1107. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2004.06.014>
- Ferenczi, M.A., Homsher, E., Trentham, D.R., 1984. The kinetics of magnesium adenosine triphosphate cleavage in skinned muscle fibres of the rabbit. *J. Physiol.* 352, 575–599.
- Fernández-García, E., Carvajal-Lérida, I., Jarén-Galán, M., Garrido-Fernández, J., Pérez-Gálvez, A., Hornero-Méndez, D., 2012. Carotenoids bioavailability from foods: From plant pigments to efficient biological activities. *Food Res. Int.* 46, 438–450. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.06.007>
- Ferrazzano, G.F., Amato, I., Ingenito, A., De Natale, A., Pollio, A., 2009. Anti-cariogenic effects of polyphenols from plant stimulant beverages (cocoa, coffee, tea). *Fitoterapia* 80, 255–262. <https://doi.org/10.1016/j.fitote.2009.04.006>
- Fieser, L.F., 1950. Absorption spectra of carotenoids; structure of vitamin A2. *J. Org. Chem.* 15, 930–943. <https://doi.org/10.1021/jo01151a003>
- Filho, A.C.M., Hoffmann, M.E., Meneghini, R., 1984. Cell killing and DNA damage by hydrogen peroxide are mediated by intracellular iron. *Biochem. J.* 218, 273–275.
- Finch, C.A., Stray, S., Huebers, H.A., Bellotti, V., Lipschitz, D.A., Cook, J.D., Pippard, M.J., 1986. Plasma ferritin determination as a diagnostic tool. *West. J. Med.* 145, 657–63.
- Fleckenstein, A., 1951. Zur Energetik des Natrium-Kalium-Austauschs am angeregten Nerven. *Arch. für die gesamte Physiol.* 253, 321–327.
- Flint, D.H., Tuminello, J.F., Emptage, M.H., 1993. The inactivation of Fe-S cluster containing hydro-lyases by superoxide. *J. Biol. Chem.* 268, 22369–22376.
- Floss, D.S., Walter, M.H., 2009. Role of carotenoid cleavage dioxygenase 1 (CCD1) in apocarotenoid biogenesis revisited. *Plant Signal. Behav.* 4, 172–175. <https://doi.org/10.4161/psb.4.3.7840>
- Flynn, A., Hirvonen, T., Mensink, G.B.M., Ocké, M.C., Serra-Majem, L., Stos, K., Szponar, L., Tetens, I., Turrini, A., Fletcher, R., Wildemann, T., 2009. Intake of selected nutrients from foods, from fortification and from supplements in various European countries. *Food Nutr. Res.* 53, 1–51. <https://doi.org/10.3402/fnr.v53i0.2038>

- Folta, K.M., 2004. Green light stimulates early stem elongation, antagonizing light-mediated growth inhibition. *Plant Physiol.* 135, 1407–1416. <https://doi.org/10.1104/pp.104.038893>
- Fong, K.L., McCay, P.B., Poyer, J.L., Misra, H.P., Keele, B.B., 1976. Evidence for superoxide-dependent reduction of Fe³⁺ and its role in enzyme-generated hydroxyl radical formation. *Chem. Biol. Interact.* 15, 77–89. [https://doi.org/10.1016/0009-2797\(76\)90130-7](https://doi.org/10.1016/0009-2797(76)90130-7)
- Ford, E.S., Mokdad, A.H., 2003. Dietary magnesium intake in a national sample of U.S. adults. *J. Nutr.* 133, 2879–2882.
- Forehand, J.R., Pabst, M.J., Phillips, W.A., Johnston, R.B., 1989. Lipopolysaccharide priming of human neutrophils for an enhanced respiratory burst. Role of intracellular free calcium. *J. Clin. Invest.* 83, 74–83. <https://doi.org/10.1172/JCI113887>
- Foreman, J., Demidchik, V., Bothwell, J.H.F., Mylona, P., Miedema, H., Angel Torres, M., Linstead, P., Costa, S., Brownlee, C., Jones, J.D.G., Davies, J.M., Dolan, L., 2003. Reactive oxygen species produced by NADPH oxidase regulate plant cell growth. *Nature* 422, 442–446. <https://doi.org/10.1038/nature01485>
- Forrest, G.I., 1969. Effects of light and darkness on polyphenol distribution in the tea plant (*Camellia sinensis* L.). *Biochem. J* 113, 773–781.
- Forti, G., Ehrenheim, A.M., 1993. The role of ascorbic acid in photosynthetic electron transport. *BBA - Bioenerg.* 1183, 408–412. [https://doi.org/10.1016/0005-2728\(93\)90246-C](https://doi.org/10.1016/0005-2728(93)90246-C)
- Foyer, C., Rowell, J., Walker, D., 1983. Measurement of the ascorbate content of spinach leaf protoplasts and chloroplasts during illumination. *Planta* 157, 239–244. <https://doi.org/10.1007/BF00405188>
- Foyer, C.H., Halliwell, B., 1976. The presence of glutathione and glutathione reductase in chloroplasts: A proposed role in ascorbic acid metabolism. *Planta* 133, 21–25. <https://doi.org/10.1007/BF00386001>
- Foyer, C.H., Leiadais, M., Kunert, K.J., 1994. Photooxidative stress in plants. *Physiol. Plant.* 92, 696–717.
- Foyer, C.H., Lelandais, M., 1996. A comparison of the relative rates of transport of glucose and plasmalemma membranes of Pea leaf mesophyll cells. *J. Plant Physiol.* 148, 391–398. [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(96\)80271-9](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(96)80271-9)
- Fraga, C.G., Motchnik, P.A., Shigenaga, M.K., Helbock, H.J., Jacob, R.A., Ames, B.N., 1991. Ascorbic acid protects against endogenous oxidative DNA damage in human sperm. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 88, 11003–11006.
- Franceschi, V.R., 2001. Calcium Oxalate in plants. *Trends Plant Sci.* 6, 331.
- Franceschi, V.R., 1987. Oxalic acid metabolism and calcium oxalate formation in *Lemna minor* L. *Plant. Cell Environ.* 10, 397–406. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1987.tb01816.x>
- Franceschi, V.R., Nakata, P.A., 2005. Calcium oxalate in plants: Formation and function. *Annu. Rev. Plant Biol.* 56, 41–71. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.56.032604.144106>
- Franceschi, V.R., Schueren, A.M., 1986. Incorporation of strontium into plant calcium oxalate crystals. *Protoplasma* 130, 199–205. <https://doi.org/10.1007/BF01276601>
- Franciosini, A., Serino, G., Deng, X.W., 2014. COP9 signalosome network, in: *Molecular Biology*. pp. 313–332. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7570-5_13
- Frank, H. a, Chynwat, V., Desamero, R.Z.B., Farhoosh, R., Erickson, J., Bautista, J., 1997. On the photophysics and photochemical properties of carotenoids and their role as light-harvesting pigments in photosynthesis. *Pure Appl. Chem.* 69, 2117–2124.

- Franke, W., Heber, U., 1964. Über die quantitative Verteilung der Ascorbinsäure innerhalb der Pflanzenzelle. *Zeitschrift für Naturforsch.* 19, 1146–1149. <https://doi.org/10.1515/znb-1964-1213>
- Franklin, K.A., Lee, S.H., Patel, D., Kumar, S. V., Spartz, A.K., Gu, C., Ye, S., Yu, P., Breen, G., Cohen, J.D., Wigge, P.A., Gray, W.M., 2011. PHYTOCHROME-INTERACTING FACTOR 4 (PIF4) regulates auxin biosynthesis at high temperature. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 108, 20231–20235. <https://doi.org/10.1073/pnas.1110682108>
- Frantz, J.M., Joly, R.J., Mitchell, C.A., 2000. Intrac canopy lighting influences radiation capture, productivity, and leaf senescence in cowpea canopies. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 125, 694–701. <https://doi.org/10.21273/jashs.125.6.694>
- Fraser, C.M., Chapple, C., 2011. The Phenylpropanoid Pathway in Arabidopsis. *Arab. B.* 9, e0152. <https://doi.org/10.1199/tab.0152>
- Frechilla, S., Talbott, L.D., Bogomolni, R.A., Zeiger, E., 2000. Reversal of blue light-stimulated stomatal opening by green light. *Plant Cell Physiol.* 41, 171–176. <https://doi.org/10.1093/pcp/41.2.171>
- Fredeen, A.L., Raab, T.K., Rao, I.M., Terry, N., 1990. Effects of phosphorus nutrition on photosynthesis in Glycine max (L.) Merr. *Planta* 181, 399–405.
- Frei, B., England, L., Ames, B.N., 1989. Ascorbate is an outstanding antioxidant in human blood plasma. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 86, 6377–6381. <https://doi.org/10.1073/PNAS.86.16.6377>
- Frei, B., Forte, T.M., Ames, B.N., Cross, C.E., 2015. Gas phase oxidants of cigarette smoke induce lipid peroxidation and changes in lipoprotein properties in human blood plasma. Protective effects of ascorbic acid. *Biochem. J.* 277, 133–138. <https://doi.org/10.1042/bj2770133>
- Freye, R., 2018. Vitamin-C-Mangel-auch in der Gegenwart eine Herausforderung. *Geriatric-Report* 13, 48. <https://doi.org/10.1007/s42090-018-0085-3>
- Fries, N., 1952. Variations in the content of phosphorus, nucleic acids and adenine in the leaves of some deciduous trees during the autumn. *Plant Soil* 4, 29–42. <https://doi.org/10.1007/BF01343507>
- Frigerio, M., Alabadí, D., Pérez-Gómez, J., García-Cárcel, L., Phillips, A.L., Hedden, P., Blázquez, M.A., 2006. Transcriptional regulation of gibberellin metabolism genes by auxin signaling in Arabidopsis. *Plant Physiol.* 142, 553–563. <https://doi.org/10.1104/pp.106.084871>
- Fu, S., Yang, L., Li, P., Hofmann, O., Dicker, L., Hide, W., Watkins, S.M., Ivanov, A., Hotamisligil, G.S., 2011. Aberrant lipid metabolism disrupts calcium homeostasis causing liver endoplasmic reticulum stress in obesity. *Nature* 473, 528–531. <https://doi.org/10.1038/nature09968>. Aberrant
- Fu, X., Harberd, N.P., 2003. Auxin promotes Arabidopsis root growth by modulating gibberellin response. *Nature* 421, 740–743. <https://doi.org/10.1038/nature01387>
- Fufezan, C., Rutherford, A.W., Krieger-Liszkay, A., 2002. Singlet oxygen production in herbicide-treated photosystem II. *FEBS Lett.* 532, 407–410. [https://doi.org/10.1016/S0014-5793\(02\)03724-9](https://doi.org/10.1016/S0014-5793(02)03724-9)
- Fuglevand, G., 1996. UV-B, UV-A, and blue light signal transduction pathways interact synergistically to regulate chalcone synthase gene expression in Arabidopsis. *Plant Cell* 8, 2347–2357. <https://doi.org/10.1105/tpc.8.12.2347>
- Fuhrman, B., Volkova, N., Coleman, R., Aviram, M., 2005. Grape powder polyphenols atten-

- uate atherosclerosis development in apolipoprotein E deficient (E0) mice and reduce macrophage atherogenicity. *J. Nutr.* 135, 722–728. <https://doi.org/10.1093/jn/135.4.722>
- Fujii, Y., Tanaka, H., Konno, N., Ogasawara, Y., Hamashima, N., Tamura, S., Hasegawa, S., Hayasaki, Y., Okajima, K., Kodama, Y., 2017. Phototropin perceives temperature based on the lifetime of its photoactivated state. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 114, 9206–9211. <https://doi.org/10.1073/pnas.1704462114>
- Fukazawa, J., Sakai, T., Ishida, S., Yamaguchi, I., Kamiya, Y., Takahashi, Y., 2000. REPRESSION OF SHOOT GROWTH, a bZIP transcriptional activator, regulates cell elongation by controlling the level of gibberellins. *Plant Cell* 12, 901–915. <https://doi.org/10.1105/tpc.12.6.901>
- Fukuda, N., Kobayashi-Yoshinaka, M., Ubukawa, M., Takayanagi, K., Sase, S., 2002. Effects of light quality, intensity and duration from different artificial light sources on the growth of *Petunia* (*Petunia x hybrida* Vilm.). *J. Japanese Soc. Hortic. Sci.* 71, 509–516.
- Fuller, C.J., Faulkner, H., Bendich, A., Parker, R.S., Roe, D.A., 1992. Effect of β -carotene supplementation on photosuppression of delayed-type hypersensitivity in normal young men. *Am. J. Clin. Nutr.* 56, 684–690. <https://doi.org/10.1093/ajcn/56.4.684>
- Funatogawa, K., Hayashi, S., Shimomura, H., Yoshida, T., Hatano, T., Ito, H., Hirai, Y., 2004. Antibacterial activity of hydrolyzable tannins derived from medicinal plants against *Helicobacter pylori*. *Microbiol. Immunol.* 48, 251–261. <https://doi.org/10.1111/j.1348-0421.2004.tb03521.x>
- Gabrio, B.W., Shoden, A., Finch, C.A., 1953. A quantitative fractionation of tissue ferritin and hemosiderin. *J. Biol. Chem.* 204, 815–821.
- Gal, A., Brumfeld, V., Weiner, S., Addadi, L., Oron, D., 2012. Certain biominerals in leaves function as light scatterers. *Adv. Mater.* 24, 77–83. <https://doi.org/10.1002/adma.201104548>
- Galano, A., 2007. Relative antioxidant efficiency of a large series of carotenoids in terms of one electron transfer reactions. *J. Phys. Chem. B* 111, 12898–12908. <https://doi.org/10.1021/jp074358u>
- Galau, G.A., Bijaisoradat, N., Hughes, D.W., 1987. Accumulation kinetics of cotton late embryogenesis-abundant mRNAs and storage protein mRNAs: Coordinate regulation during embryogenesis and the role of abscisic acid. *Dev. Biol.* 123, 198–212. [https://doi.org/10.1016/0012-1606\(87\)90442-8](https://doi.org/10.1016/0012-1606(87)90442-8)
- Galetskiy, D., Lohscheider, J.N., Kononikhin, A.S., Popov, I.A., Nikolaev, E.N., Adamska, I., 2011a. Mass spectrometric characterization of photooxidative protein modifications in *Arabidopsis thaliana* thylakoid membranes. *Rapid Commun. Mass Spectrom.* 25, 184–190. <https://doi.org/10.1002/rcm.4855>
- Galetskiy, D., Lohscheider, J.N., Kononikhin, A.S., Popov, I.A., Nikolaev, E.N., Adamska, I., 2011b. Phosphorylation and nitration levels of photosynthetic proteins are conversely regulated by light stress. *Plant Mol. Biol.* 77, 461–473. <https://doi.org/10.1007/s11103-011-9824-7>
- Gallaher, R.N., 1975. The occurrence of calcium in plant tissue as crystals of calcium oxalate. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 6, 315–330.
- Galvez-Valdivieso, G., Fryer, M.J., Lawson, T., Slattery, K., Truman, W., Smirnoff, N., Asami, T., Davies, W.J., Jones, A.M., Baker, N.R., Mullineaux, P.M., 2009. The high light response in *Arabidopsis* involves ABA signaling between vascular and bundle sheath cells. *Plant Cell* 21, 2143–2162. <https://doi.org/10.1105/tpc.108.061507>

- Gan, S., Amasino, R.M., 1995. Inhibition of leaf senescence by autoregulated production of cytokinin. *Science* (80-.). 270, 1986–1988.
- Gangappa, S.N., Botto, J.F., 2016. The multifaceted roles of HY5 in plant growth and development. *Mol. Plant* 9, 1353–1365. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2016.07.002>
- Ganjewala, D., Kumar, S., 2008. An account of cloned genes of methyl-erythritol-4- phosphate pathway of isoprenoid biosynthesis in plants. *Curr. Issues Mol. Biol.* 11, 35–46.
- Garcia-asua, G., Lang, H.P., Cogdell, R.J., Hunter, C.N., 1998. Carotenoid diversity: a modular role for the phytoene desaturase step. *Trends Plant Sci.* 3, 445–449.
- García-Macías, P., Ordidge, M., Vysini, E., Waroonphan, S., Battey, N.H., Gordon, M.H., Hadley, P., John, P., Lovegrove, J.A., Wagstaffe, A., 2007. Changes in the flavonoid and phenolic acid contents and antioxidant activity of red leaf lettuce (Lollo Rosso) due to cultivation under plastic films varying in ultraviolet transparency. *J. Agric. Food Chem.* 55, 10168–10172. <https://doi.org/10.1021/jf071570m>
- Gardner, P.R., Raineri, I., Epstein, L.B., White, C.W., 1995. Superoxide radical and iron modulate aconitase activity in mammalian cells. *J. Biol. Chem.* 270, 13399–13405.
- Garg, N., Manchanda, G., 2009. ROS generation in plants: Boon or bane? *Plant Biosyst.* 143, 81–96. <https://doi.org/10.1080/11263500802633626>
- Gates, D.M., 1966. Spectral distribution of solar radiation at the Earth's surface. *Science* (80-.). 151, 523–529.
- Gatseva, P.D., Argirova, M.D., 2008. High-nitrate levels in drinking water may be a risk factor for thyroid dysfunction in children and pregnant women living in rural Bulgarian areas. *Int. J. Hyg. Environ. Health* 211, 555–559. <https://doi.org/10.1016/J.IJHEH.2007.10.002>
- Gaudillere, J., Moing, A., 1992. Photosynthesis of peach leaves: light adaptation, limiting factors and sugar content. *Acta Hortic.* 315, 103–110. <https://doi.org/10.17660/acta-hortic.1992.315.12>
- Gaunt, W.E., Irving, J.T., 1940. The influence of dietary calcium and phosphorus upon tooth formation. *J. Physiol.* 99, 18–29. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1940.sp003875>
- Genoud, T., Santa Cruz, M.T., Kulisic, T., Sparla, F., Fankhauser, C., Métraux, J.P., 2008a. The protein phosphatase 7 regulates phytochrome signaling in Arabidopsis. *PLoS One* 3, 1–10. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0002699>
- Genoud, T., Schweizer, F., Tscheuschler, A., Debrieux, D., Casal, J.J., Schäfer, E., Hiltbrunner, A., Fankhauser, C., 2008b. FHY1 mediates nuclear import of the light-activated phytochrome A photoreceptor. *PLoS Genet.* 4, 1–12. <https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1000143>
- Gent, M.P.N., 2019. Density and duration of shade affect water and nutrient use in greenhouse tomato. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 133, 619–627. <https://doi.org/10.21273/jashs.133.4.619>
- Genty, B., Briantais, J.M., Baker, N.R., 1989. The relationship between the quantum yield of photosynthetic electron transport and quenching of chlorophyll fluorescence. *Biochim. Biophys. Acta - Gen. Subj.* 990, 87–92. [https://doi.org/10.1016/S0304-4165\(89\)80016-9](https://doi.org/10.1016/S0304-4165(89)80016-9)
- George, T.S., Simpson, R.J., Hadobas, P.A., Richardson, A.E., 2005. Expression of a fungal phytase gene in *Nicotiana tabacum* improves phosphorus nutrition of plants grown in amended soils. *Plant Biotechnol. J.* 3, 129–140. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7652.2004.00116.x>
- Gierth, M., Ma, P., Schroeder, J.I., 2005. The potassium transporter AtHAK5 functions in K⁺ deprivation-induced high-affinity K⁺ uptake and AKT1 K⁺ channel contribution to K⁺ uptake kinetics in Arabidopsis roots. *Plant Physiol.* 137, 1105–1114.

<https://doi.org/10.1104/pp.104.057216.many>

- Gierth, M., Mäser, P., 2007. Potassium transporters in plants - Involvement in K⁺ acquisition, redistribution and homeostasis. *FEBS Lett.* 581, 2348–2356. <https://doi.org/10.1016/j.febslet.2007.03.035>
- Gillham, D.J., Dodge, A.D., 1987. Chloroplast superoxide and hydrogen peroxide scavenging systems from pea leaves: Seasonal variations. *Plant Sci.* 50, 105–109. [https://doi.org/10.1016/0168-9452\(87\)90145-2](https://doi.org/10.1016/0168-9452(87)90145-2)
- Giordano, F.J., 2005. Oxygen, oxidative stress, hypoxia, and heart failure. *J. Clin. Invest.* 115, 500–508. <https://doi.org/10.1172/JCI200524408.500>
- Gislerød, H.R., Adams, P., 1983. Diurnal variations in the oxygen content and acid requirement of recirculating nutrient solutions and in the uptake of water and potassium by cucumber and tomato plants. *Sci. Hortic. (Amsterdam)*. 21, 311–321. [https://doi.org/10.1016/0304-4238\(83\)90121-8](https://doi.org/10.1016/0304-4238(83)90121-8)
- Gislerød, H.R., Eidsten, I.M., Mortensen, L.M., 1989. The interaction of daily lighting period and light intensity on growth of some greenhouse plants. *Sci. Hortic. (Amsterdam)*. 38, 295–304. [https://doi.org/10.1016/0304-4238\(89\)90077-0](https://doi.org/10.1016/0304-4238(89)90077-0)
- Gislerød, H.R., Selmer-Olsen, A.R., Mortensen, L.M., 1987. The effect of air humidity on nutrient uptake of some greenhouse plants. *Plant Soil* 102, 193–196. <https://doi.org/10.1007/BF02370702>
- Giusti, M.M., Rodríguez-Saona, L.E., Wrolstad, R.E., 1999. Molar absorptivity and color characteristics of acylated and non-acylated pelargonidin-based anthocyanins. *J. Agric. Food Chem.* 47, 4631–4637. <https://doi.org/10.1021/jf981271k>
- Giusti, M.M., Wrolstad, R.E., 2001. Anthocyanins. Characterization and measurement with UV-visible spectroscopy. *Curr. Protoc. Food Anal. Chem.* 0, 1–13.
- Glass, A.D.M., Thompson, R.G., Bordeleau, L., 1985. Regulation of NO₃[–] influx in barley. *Plant Physiol.* 77, 379–381. <https://doi.org/10.1104/pp.77.2.379>
- Glembotski, C.C., 1984. The α-amidation of α-melanocyte stimulating hormone in intermediate pituitary requires ascorbic acid. *J. Biol. Chem.* 259, 13041–13048.
- Gocal, G.F.W., Sheldon, C.C., Gubler, F., Moritz, T., Bagnall, D.J., Macmillan, C.P., Li, S.F., Parish, R.W., Dennis, E.S., Weigel, D., King, R.W., 2001. GAMYB-like Genes, Flowering- Gocal, G. F. W., Sheldon, C. C., Gubler, F., Moritz, T., Bagnall, D. J., Macmillan, C. P., ... King, R. W. (2001). GAMYB-like Genes, Flowering, and Gibberellin Signaling in Arabidopsis 1. doi:10.1104/pp.010442.1682g, and Gibber. *Plant Physiol.* 127, 1682–1693. <https://doi.org/10.1104/pp.010442.1682>
- Goins, G.D., Yorlino, N.C., Sanwo, M.M., Brown, C.S., 1997. Photomorphogenesis, photosynthesis, and seed yield of wheat plants grown under red light-emitting diodes (LEDs) with and without supplemental blue lighting. *J. Exp. Bot.* 48, 1407–1413. <https://doi.org/10.1093/jxb/48.7.1407>
- Gomez, C., Morrow, R.C., Bourget, C.M., Massa, G.D., Mitchell, C.A., 2013. Comparison of intracanopy light-emitting diode towers and overhead high-pressure sodium lamps for supplemental lighting of greenhouse-grown tomatoes. *Horttechnology* 23, 93–98. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Gong, G., Waris, G., Tanveer, R., Siddiqui, A., 2001. Human hepatitis C virus NS5A protein alters intracellular calcium levels, induces oxidative stress, and activates STAT-3 and NF-κB. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 98, 9599–9604.

- Gong, Y.F., Liao, Z.H., Guo, B.H., Sun, X.F., Tang, K.X., 2006. Molecular cloning and expression profile analysis of Ginkgo biloba DXS gene encoding 1-deoxy-D-xylulose 5-phosphate synthase, the first committed enzyme of the 2-C-methyl-D-erythritol 4-phosphate pathway. *Planta Med.* 72, 329–335. <https://doi.org/10.1055/s-2005-916234>
- Goodman, D.S., Huang, H.S., Shiratori, T., 1966. Mechanism of the biosynthesis of Vitamin A from beta-Carotene. *J. Biol. Chem.* 241, 1929–1932.
- Gorham, J., 1987. Photosynthesis, transpiration and salt fluxes through leaves of *Leptochloa fusca* L. Kunth. *Plant. Cell Environ.* 10, 191–196. <https://doi.org/10.1111/1365-3040.ep11602151>
- Górski, T., 1980. Annual cycle of the red and far red radiation. *Int. J. Biometeorol.* 24, 361–365. <https://doi.org/10.1007/BF02250579>
- Górski, T., 1976. Red and far red radiation at sunset - Annual cycle and dependence on precipitable water. *Naturwissenschaften* 63, 530–531. <https://doi.org/10.1007/BF00596854>
- Gotoh, N., Niki, E., 1992. Rates of interactions of superoxide with vitamin E, vitamin C and related compounds as measured by chemiluminescence. *BBA - Gen. Subj.* 1115, 201–207. [https://doi.org/10.1016/0304-4165\(92\)90054-X](https://doi.org/10.1016/0304-4165(92)90054-X)
- Gould, K.S., McKelvie, J., Markham, K.R., 2002. Do anthocyanins function as antioxidants in leaves? Imaging of H₂O₂ in red and green leaves after mechanical injury. *Plant, Cell Environ.* 25, 1261–1269. <https://doi.org/10.1001/jamasurg.2015.5514>
- Grabski, S., Arnoys, E., Busch, B., Schindler, M., 1998. Regulation of actin tension in plant cells by kinases and phosphatases. *Plant Physiol.* 116, 279–290. <https://doi.org/10.1104/pp.116.1.279>
- Grahl, H., Wild, A., 1973. Lichtinduzierte Veränderungen im Photosynthese-Apparat von *Sinapis alba*. *Ber. Dtsch. Bot. Ges.* 86, 341–349.
- Graumlich, J.F., Ludden, T.M., Conry-Cantilena, C., Cantilena, L.R., Wang, Y., Levine, M., 1997. Pharmacokinetic model of ascorbic acid in healthy male volunteers during depletion and repletion. *Pharm. Res.* 14, 1133–1139. <https://doi.org/10.1023/A:1012186203165>
- Grbic, N., Paschko, K., Pinker, I., Böhme, M.H., 2016. Effect of different light spectra by using coloured plastic films on growth, fresh and dry matter, nutrient solution uptake and secondary metabolites of *Perilla frutescens* (L.) Britt. *Sci. Hortic. (Amsterdam)*. 210, 93–98. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.07.016>
- Green, B.R., Durnford, D.G., 1996. The chlorophyll-carotenoid proteins of oxygenic photosynthesis. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 47, 685–714. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.47.1.685>
- Green, R., Charlton, R., Seftel, H., Bothwell, T., Mayet, F., Adams, B., Finch, C., Layrisse, M., 1968. Body iron excretion in man. *Am. J. Med.* 45, 336–353. [https://doi.org/10.1016/0002-9343\(68\)90069-7](https://doi.org/10.1016/0002-9343(68)90069-7)
- Greenacre, S., Ischiropoulos, H., 2001. Tyrosine nitration: Localisation, quantification, consequences for protein function and signal transduction. *Free Radic. Res.* 34, 541–581. <https://doi.org/10.1080/10715760100300471>
- Greer, P.L., Greenberg, M.E., 2008. From synapse to nucleus: calcium-dependent gene transcription in the control of synapse development and function. *Neuron* 59, 846–860. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2008.09.002>
- Greig, A.J., Patterson, A.J., Collins, C.E., Chalmers, K.A., 2013. Iron deficiency, cognition, mental health and fatigue in women of childbearing age: A systematic review. *J. Nutr. Sci.* 2,

1–14. <https://doi.org/10.1017/jns.2013.7>

- Gross, N., Suding, K.N., Lavorel, S., 2007. Leaf dry matter content and lateral spread predict response to land use change for six subalpine grassland species. *J. Veg. Sci.* 18, 289–300. <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2007.tb02540.x>
- Grosso, G., Stepaniak, U., Topor-Madry, R., Szafraniec, K., Pajak, A., 2014. Estimated dietary intake and major food sources of polyphenols in the Polish arm of the HAPIEE study. *Nutrition* 30, 1398–1403. <https://doi.org/10.1016/j.nut.2014.04.012>
- Groves, J.T., Haushalter, R.C., Nakamura, M., Nemo, T.E., Evans, B.J., 1981. High-valent iron-porphyrin complexes related to peroxidase and cytochrome p-450. *J. Am. Chem. Soc.* 103, 2884–2886. <https://doi.org/10.1021/ja00400a075>
- Gruszecki, W.I., Strzałka, K., 2005. Carotenoids as modulators of lipid membrane physical properties. *Biochim. Biophys. Acta - Mol. Basis Dis.* 1740, 108–115. <https://doi.org/10.1016/j.bbadis.2004.11.015>
- Guerra, D., Anderson, A.J., Salisbury, F.B., 2008. Reduced Phenylalanine Ammonia-Lyase and Tyrosine Ammonia-Lyase Activities and Lignin Synthesis in Wheat Grown under Low Pressure Sodium Lamps. *Plant Physiol.* 78, 126–130. <https://doi.org/10.1104/pp.78.1.126>
- Guo, H., Duong, H., Ma, N., Lin, C., 1999. The Arabidopsis blue light receptor cryptochrome 2 is a nuclear protein regulated by a blue light-dependent post-transcriptional mechanism. *Plant J.* 19, 279–287.
- Guo, H., Mockler, T., Duong, H., Lin, C., 2001. SUB1, an Arabidopsis Ca²⁺-binding protein involved in cryptochrome and phytochrome coaction. *Science* (80-.). 291, 487–490. <https://doi.org/10.1126/science.291.5503.487>
- Guo, H., Yang, H., Mockler, T.C., Lin, C., 1998. Regulation of flowering time by Arabidopsis photoreceptors. *Science* (80-.). 279, 1360–1363. <https://doi.org/10.1242/dev.02340>
- Guo, W., Nazim, H., Liang, Z., Yang, D., 2016a. Magnesium deficiency in plants: An urgent problem. *Crop J.* 4, 83–91. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2015.11.003>
- Guo, X., Hao, X., Zheng, J.M., Little, C., Khosla, S., 2016b. Response of greenhouse mini-cucumber to different vertical spectra of LED lighting under overhead high pressure sodium and plasma lighting. *Acta Hortic.* 1134, 87–93. <https://doi.org/10.17660/Acta-Hortic.2016.1134.12>
- Gupta, S., Lakshmi, J., Prakash, J., 2006. In vitro bioavailability of calcium and iron from selected green leafy vegetables. *J. Sci. Food Agric.* 86, 2147–2152. <https://doi.org/10.1002/jsfa>
- Gupta, S.K., Halder, N., Srivastava, S., Trivedi, D., Joshi, S., Varma, S.D., 2002. Green tea (*Camellia sinensis*) protects against selenite-induced oxidative stress in experimental cataractogenesis. *Ophthalmic Res.* 34, 258–263. <https://doi.org/10.1159/000063881>
- Gusta, L. V., Trischuk, R., Weiser, C.J., 2005. Plant cold acclimation: The role of abscisic acid. *J. Plant Growth Regul.* 24, 308–318. <https://doi.org/10.1007/s00344-005-0079-x>
- Gutiérrez, O.M., Luzuriaga-McPherson, A., Lin, Y., Gilbert, L.C., Ha, S.W., Beck, G.R., 2015. Impact of phosphorus-based food additives on bone and mineral metabolism. *J. Clin. Endocrinol. Metab.* 100, 4264–4271. <https://doi.org/10.1210/jc.2015-2279>
- Gyula, P., Schäfer, E., Nagy, F., 2003. Light perception and signalling in higher plants. *Curr. Opin. Plant Biol.* 6, 446–452. [https://doi.org/10.1016/S1369-5266\(03\)00082-7](https://doi.org/10.1016/S1369-5266(03)00082-7)
- Haldimann, P., 1999. How do changes in temperature during growth affect leaf pigment composition and photosynthesis in *Zea mays* genotypes differing in sensitivity to low temperature?

- J. Exp. Bot. 50, 543–550. <https://doi.org/10.1093/jxb/50.333.543>
- Haldimann, P., Fracheboud, Y., Stamp, P., 1995. Carotenoid composition in *Zea mays* developed at sub-optimal temperature and different light intensities. *Physiol. Plant.* 95, 409–414. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1995.tb00856.x>
- Halevy, S., Koth, H., Guggenheim, K., 1957. The vitamin and mineral content of fruits and vegetables grown in Israel. *Br. J. Nutr.* 11, 409–413. <https://doi.org/10.1079/bjn19570062>
- Hallberg, L., Hultén, L., Gramatkovski, E., 1997. Iron absorption from the whole diet in men: How effective is the regulation of iron absorption? *Am. J. Clin. Nutr.* 66, 347–356. <https://doi.org/10.1093/ajcn/66.2.347>
- Halliday, K.J., Martínez-García, J.F., Josse, E.M., 2009. Integration of light and auxin signaling. *Cold Spring Harb. Perspect. Biol.* 1, 1–12. <https://doi.org/10.1101/cshperspect.a001586>
- Halliwell, B., Aruoma, O.I., 1991. DNA damage by oxygen-derived species. *FEBS Lett.* 281, 9–19.
- Halliwell, B., Chirico, S., 1993. Lipid peroxidation: its mechanism, measurement, and significance. *Am. J. Clin. Nutr.* 57, 715S–725S.
- Hallmark, W.B., Huffaker, R.C., 1978. The Influence of ambient nitrate, temperature, and light on nitrate assimilation in Sudangrass seedlings. *Physiol. Plant.* 44, 147–152. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1978.tb08609.x>
- Hancock, J., Desikan, R., Harrison, J., Bright, J., Hooley, R., Neill, S., 2006. Doing the unexpected: Proteins involved in hydrogen peroxide perception. *J. Exp. Bot.* 57, 1711–1718. <https://doi.org/10.1093/jxb/erj180>
- Hancock, J.T., Desikan, R., Clarke, A., Hurst, R.D., Neill, S.J., 2002. Cell signalling following plant/pathogen interactions involves the generation of reactive oxygen and reactive nitrogen species. *Plant Physiol. Biochem.* 40, 611–617. [https://doi.org/10.1016/S0981-9428\(02\)01403-1](https://doi.org/10.1016/S0981-9428(02)01403-1)
- Hancock, R.D., McDougall, G.J., Stewart, D., 2007. Berry fruit as “superfood”: hope or hype?: Discovery Service for University of Portsmouth. *Biologist* 54, 73–79.
- Handelman, G.J., 2001. The evolving role of carotenoids in human biochemistry. *Nutrition* 17, 818–822. [https://doi.org/10.1016/S0899-9007\(01\)00640-2](https://doi.org/10.1016/S0899-9007(01)00640-2)
- Hao, Y., Oh, E., Choi, G., Liang, Z., Wang, Z.Y., 2012. Interactions between HLH and bHLH factors modulate light-regulated plant development. *Mol. Plant* 5, 688–697. <https://doi.org/10.1093/mp/sss011>
- Harbinson, J., Foyer, C.H., 1991. Relationships between the efficiencies of photosystems I and II and stromal redox state in CO₂-free air: evidence for cyclic electron flow in vivo. *Plant Physiol.* 97, 41–49. <https://doi.org/10.1104/pp.97.1.41>
- Hardie, D.G., 2008. Role of AMP-activated protein kinase in the metabolic syndrome and in heart disease. *FEBS Lett.* 582, 81–89. <https://doi.org/10.1016/j.febslet.2007.11.018>
- Harding, R.W., Turner, R. V., 1981. Photoregulation of the carotenoid biosynthetic pathway in albino and white collar mutants of *Neurospora crassa*. *Plant Physiol.* 68, 745–749. <https://doi.org/10.1104/pp.68.3.745>
- Hardtke, C.S., Gohda, K., Osterlund, M.T., Oyama, T., Okada, K., Wang Deng, X., 2000. HY5 stability and activity in *Arabidopsis* is regulated by phosphorylation in its COP1 binding domain. *EMBO J.* 19, 4997–5006. <https://doi.org/10.1093/emboj/19.18.4997>

- Harley, P.C., Litvak, M.E., Sharkey, T.D., Monson, R.K., 1994. Isoprene emission from velvet bean leaves. *Plant Physiol.* 105, 279–285.
- Harrison, M., Fraser, R., 1960. Bone structure and metabolism in calcium-deficient rats. *J. Endocrinol.* 21, 197–205. <https://doi.org/10.1677/joe.0.0210197>
- Hasling, C., Sondergaard, K., Charles, P., Mosekilde, L., 1992. Calcium metabolism in post-menopausal osteoporotic women is determined by dietary calcium and coffee intake. *J. Nutr.* 122, 1119–1126. <https://doi.org/10.1093/jn/122.5.1119>
- Havaux, M., 1998. Carotenoids as membrane stabilizers in chloroplasts. *Trends Plant Sci.* 3, 147–151. [https://doi.org/10.1016/S1360-1385\(98\)01200-X](https://doi.org/10.1016/S1360-1385(98)01200-X)
- Havaux, M., Dall'Osto, L., Bassi, R., 2007. Zeaxanthin has enhanced antioxidant capacity with respect to all other xanthophylls in Arabidopsis leaves and functions independent of binding to PSII antennae. *Plant Physiol.* 145, 1506–1520. <https://doi.org/10.1104/pp.107.108480>
- Havaux, M., Niyogi, K.K., 1999. The violaxanthin cycle protects plants from photooxidative damage by more than one mechanism. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 96, 8762–8767. <https://doi.org/10.1073/pnas.96.15.8762>
- Hawkesford, M., Horst, W., Kichey, T., Lambers, H., Schjoerring, J., Møller, I.S., White, P., 2011. Functions of Macronutrients, in: Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants: Third Edition. Elsevier Ltd, pp. 135–189. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.00006-6>
- Hayek, T., Fuhrman, B., Vaya, J., Rosenblat, M., Belinky, P., Coleman, R., Elis, A., Aviram, M., 1997. Reduced progression of atherosclerosis in apolipoprotein E-deficient mice following consumption of red wine, or its polyphenols quercetin or catechin, is associated with reduced susceptibility of LDL to oxidation and aggregation. *Arterioscler. Thromb. Vasc. Biol.* 17, 2744–2752. <https://doi.org/10.1161/01.atv.17.11.2744>
- Hayes, J.E., Richardson, A.E., Simpson, R.J., 2000. Components of organic phosphorus in soil extracts that are hydrolysed by phytase and acid phosphatase. *Biol. Fertil. Soils* 32, 279–286. <https://doi.org/10.1007/s003740000249>
- He, F.J., Marciniak, M., Carney, C., Markandu, N.D., Anand, V., Fraser, W.D., Dalton, R.N., Kaski, J.C., MacGregor, G.A., 2010. Effects of potassium chloride and potassium bicarbonate on endothelial function, cardiovascular risk factors, and bone turnover in mild hypertensives. *Hypertension* 55, 681–688. <https://doi.org/10.1161/HYPERTENSIONAHA.109.147488>
- He, F.J., Nowson, C.A., Lucas, M., MacGregor, G.A., 2007. Increased consumption of fruit and vegetables is related to a reduced risk of coronary heart disease: Meta-analysis of cohort studies. *J. Hum. Hypertens.* 21, 717–728. <https://doi.org/10.1038/sj.jhh.1002212>
- Heaney, R.P., 2004. Phosphorus nutrition and the treatment of osteoporosis. *Mayo Clin. Proc.* 79, 91–97. <https://doi.org/10.4065/79.1.91>
- Heenan, D.P., Campbell, L.C., 1981. Influence of potassium and manganese on growth and uptake of magnesium by soybeans (*Glycine max* (L.) Merr. cv. Bragg). *Plant Soil* 61, 447–456.
- Heijde, M., Ulm, R., 2012. UV-B photoreceptor-mediated signalling in plants. *Trends Plant Sci.* 17, 230–237. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2012.01.007>
- Heiss, C., Finis, D., Kleinbongard, P., Hoffmann, A., Rassaf, T., Kelm, M., Sies, H., 2007. Sustained increase in flow-mediated dilation after daily intake of high-flavanol cocoa drink over 1 week. *J. Cardiovasc. Pharmacol.* 49, 74–80. <https://doi.org/10.1097/fjc.0b013e31802d0001>
- Hell, R., Stephan, U.W., 2003. Iron uptake, trafficking and homeostasis in plants. *Planta* 216,

541–51. <https://doi.org/10.1007/s00425-002-0920-4>

- Hemilä, H., 1999. Vitamin C supplementation and common cold symptoms: Factors affecting the magnitude of the benefit. *Med. Hypotheses* 52, 171–178. <https://doi.org/10.1054/mehy.1997.0639>
- Hemilä, H., 1996. Vitamin C and common cold incidence: a review of studies with subjects under heavy physical stress. *Int. J. Sports Med.* 17, 379–383.
- Hemilä, H., Douglas, R.M., 1999. Vitamin C and respiratory infections. *Int. J. Tuberc. Lung Dis.* 3, 756–761.
- Hemming, S., 2011. Use of natural and artificial light in horticulture - Interaction of plant and technology. *Acta Hort.* 907, 25–36.
- Hemming, S., Dueck, T., Janse, J., van Noort, F., 2008a. The effect of diffuse light on crops. *Acta Hort.* 801, 1293–1300. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2008.801.158>
- Hemming, S., Mohammadkhani, V., Dueck, T., 2008b. Diffuse greenhouse covering materials - Material technology, measurements and evaluation of optical properties. *Acta Hort.* 797, 469–476. <https://doi.org/10.17660/actahortic.2008.797.68>
- Hemming, S., Van Der Braak, N., Dueck, T., Jongschaap, R., Marissen, N., 2006. Filtering natural light by the greenhouse covering using model simulations - More production and better plant quality by diffuse light? *Acta Hort.* 711, 105–110. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2006.711.10>
- Hemming, S., Van Os, E., Dieleman, A., Hemming, J., Swinkels, G.J., Breuer, J., Slangen, J., 2005. Possibilities of increasing production and quality of strawberry fruits and several flowers by new blue fluorescent greenhouse films. *Acta Hort.* 691, 225–232. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2005.691.26>
- Heo, H.J., Kim, Y.J., Chung, D., Kim, D.-O., 2007. Antioxidant capacities of individual and combined phenolics in a model system. *Food Chem.* 104, 87–92. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2006.11.002>
- Heo, J., Lee, B.R., Koh, J.-W., 2008. Protective effects of epigallocatechin gallate after uv irradiation of cultured human lens epithelial cells. *Korean J. Ophthalmol.* 22, 183–186. <https://doi.org/10.3341/kjo.2008.22.3.183>
- Herbert, V., Jayatilleke, E., Shaw, S., Rosman, A.S., Giardina, P., Grady, R.W., Bowman, B., Gunter, E.W., 1997. Serum ferritin iron, a new test, measures human body iron stores unconfounded by inflammation. *Stem Cells* 15, 291–296. <https://doi.org/10.1002/stem.150291>
- Hermans, C., Johnson, G.N., Strasser, R.J., Verbruggen, N., 2004. Physiological characterisation of magnesium deficiency in sugar beet: Acclimation to low magnesium differentially affects photosystems I and II. *Planta* 220, 344–355. <https://doi.org/10.1007/s00425-004-1340-4>
- Hermans, C., Vuylsteke, M., Coppens, F., Craciun, A., Inzé, D., Verbruggen, N., 2010a. Early transcriptomic changes induced by magnesium deficiency in *Arabidopsis thaliana* reveal the alteration of circadian clock gene expression in roots and the triggering of abscisic acid-responsive genes. *New Phytol.* 187, 119–131. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03258.x>
- Hermans, C., Vuylsteke, M., Coppens, F., Cristescu, S.M., Harren, F.J.M., Inzé, D., Verbruggen, N., 2010b. Systems analysis of the responses to long-term magnesium deficiency and restoration in *Arabidopsis thaliana*. *New Phytol.* 187, 132–144. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03257.x>
- Hermes Sales, C., Campos Pedrosa, L.F., Gomes Lima, J., Moura Lemos, T.M.A., Colli, C.,

2011. Influence of magnesium status and magnesium intake on the blood glucose control in patients with type 2 diabetes. *Clin. Nutr.* 30, 359–364. <https://doi.org/10.1016/j.clnu.2010.12.011>
- Hermisdorff, H.H.M., Barbosa, K.B.F., Volp, A.C.P., Puchau, B., Bressan, J., Zulet, M.Á., Martínez, J.A., 2012. Vitamin C and fibre consumption from fruits and vegetables improves oxidative stress markers in healthy young adults. *Br. J. Nutr.* 107, 1119–1127. <https://doi.org/10.1017/S0007114511004235>
- Hernandez, G., Ramirez, M., Valdes-Lopez, O., Tesfaye, M., Graham, M.A., Czechowski, T., Schlereth, A., Wandrey, M., Erban, A., Cheung, F., Wu, H.C., Lara, M., Town, C.D., Kopka, J., Udvardi, M.K., Vance, C.P., 2007. Phosphorus stress in common bean: root transcript and metabolic responses. *Plant Physiol.* 144, 752–767. <https://doi.org/10.1104/pp.107.096958>
- Hernández, I., Alegre, L., Munné-Bosch, S., 2006. Enhanced oxidation of flavan-3-ols and proanthocyanidin accumulation in water-stressed tea plants. *Phytochemistry* 67, 1120–1126. <https://doi.org/10.1016/J.PHYTOCHEM.2006.04.002>
- Hernández, I., Alegre, L., Van Breusegem, F., Munné-Bosch, S., 2009. How relevant are flavonoids as antioxidants in plants? *Trends Plant Sci.* 14, 125–132. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2008.12.003>
- Hernández, J.A., Ferrer, M.A., Jiménez, A., Barceló, A.R., Sevilla, F., 2001. Antioxidant systems and O₂(·-)/H₂O₂ production in the apoplast of pea leaves. Its relation with salt-induced necrotic lesions in minor veins. *Plant Physiol.* 127, 817–831. <https://doi.org/10.1104/pp.010188.1>
- Hernández, R., Kubota, C., 2016. Physiological responses of cucumber seedlings under different blue and red photon flux ratios using LEDs. *Environ. Exp. Bot.* 121, 66–74. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2015.04.001>
- Hernández, R., Kubota, C., 2014. Growth and morphological response of cucumber seedlings to supplemental red and blue photon flux ratios under varied solar daily light integrals. *Sci. Hortic. (Amsterdam)*. 173, 92–99. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.04.035>
- Hersch, M., Lorrain, S., de Wit, M., Trevisan, M., Ljung, K., Bergmann, S., Fankhauser, C., 2014. Light intensity modulates the regulatory network of the shade avoidance response in *Arabidopsis*. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 111, 6515–6520. <https://doi.org/10.1073/pnas.1320355111>
- Hertig, C.M., Wolosiuk, R.A., 1983. Studies on the hysteretic properties of chloroplast fructose-1,6-bisphosphatase. *J. Biol. Chem.* 258, 984–989. [https://doi.org/10.1016/0005-2744\(78\)90329-7](https://doi.org/10.1016/0005-2744(78)90329-7)
- Hidaka, K., Dan, K., Imamura, H., Miyoshi, Y., Takayama, T., Sameshima, K., Kitano, M., Okimura, M., 2013. Effect of supplemental lighting from different light sources on growth and yield of strawberry. *Environ. Control Biol.* 51, 41–47. <https://doi.org/10.2525/ecb.51.41>
- Hien, P.D., Bac, V.T., Tham, H.C., Nhan, D.D., Vinh, L.D., 2002. Influence of meteorological conditions on PM 2.5 and PM 2.5-10 concentrations during the monsoon season in Hanoi, Vietnam. *Atmos. Environ.* 36, 3473–3484.
- Hilhorst, H.W.M., Karssen, C.M., 1992. Seed dormancy and germination: the role of abscisic acid and gibberellins and the importance of hormone mutants. *Plant Growth Regul.* 11, 225–238. <https://doi.org/10.1007/BF00024561>
- Ho, C.T., Chen, Q., Shi, H., Zhang, K.Q., Rosen, R.T., 1992. Antioxidative effect of polyphenol extract prepared from various Chinese teas. *Prev. Med. (Baltim)*. 21, 520–525. [https://doi.org/10.1016/0091-7435\(92\)90059-Q](https://doi.org/10.1016/0091-7435(92)90059-Q)

- Ho, K.Y., Tsai, C.C., Huang, J.S., Chen, C.P., Lin, T.C., Lin, C.C., 2001. Antimicrobial activity of tannin components from *Vaccinium vitis-idaea* L. *J. Pharm. Pharmacol.* 53, 187–191. <https://doi.org/10.1211/0022357011775389>
- Hobbs, D.A., George, T.W., Lovegrove, J.A., 2013. The effects of dietary nitrate on blood pressure and endothelial function: A review of human intervention studies. *Nutr. Res. Rev.* 26, 210–222. <https://doi.org/10.1017/S0954422413000188>
- Hodges, E., 1987. Recommended in humans 1-3 dietary intakes (RDI) of vitamin C. *Am. J. Clin. Nutr.* 693–703.
- Hodges, R.E., Baker, E.M., Hood, J., Sauberlich, H.E., March, S.C., 1969. Experimental scurvy in man. *Am. J. Clin. Nutr.* 22, 535–548.
- Hoecker, U., 2017. The activities of the E3 ubiquitin ligase COP1/SPA, a key repressor in light signaling. *Curr. Opin. Plant Biol.* 37, 63–69. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2017.03.015>
- Hoecker, U., Quail, P.H., 2001. The Phytochrome A-specific signaling intermediate SPA1 interacts directly with COP1, a constitutive repressor of light signaling in *Arabidopsis*. *J. Biol. Chem.* 276, 38173–38178. <https://doi.org/10.1074/jbc.M103140200>
- Hoenecke, M.E., Bula, R.J., Tibbitts, T.W., 1992. Importance of “blue” photon levels for lettuce seedlings grown under red-light-emitting diodes. *HortScience* 27, 427–430.
- Hoffmann, S., Waaijenberg, D., 2002. Tropical and subtropical greenhouses - A challenge for new plastic films. *Acta Hort.* 578, 163–170. [https://doi.org/10.1016/0375-9474\(73\)90670-2](https://doi.org/10.1016/0375-9474(73)90670-2)
- Hogewoning, S.W., Douwstra, P., Trouwborst, G., Van Ieperen, W., Harbinson, J., 2010a. An artificial solar spectrum substantially alters plant development compared with usual climate room irradiance spectra. *J. Exp. Bot.* 61, 1267–1276. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq005>
- Hogewoning, S.W., Trouwborst, G., Maljaars, H., Poorter, H., van Ieperen, W., Harbinson, J., 2010b. Blue light dose-responses of leaf photosynthesis, morphology, and chemical composition of *Cucumis sativus* grown under different combinations of red and blue light. *J. Exp. Bot.* 61, 3107–3117. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq132>
- Hogewoning, S.W., Wientjes, E., Douwstra, P., Trouwborst, G., van Ieperen, W., Croce, R., Harbinson, J., 2012. Photosynthetic quantum yield dynamics: From photosystems to leaves. *Plant Cell* 24, 1921–1935. <https://doi.org/10.1105/tpc.112.097972>
- Holick, C.N., Michaud, D.S., Stolzenberg-Solomon, R., Mayne, S.T., Pietinen, P., Taylor, P.R., Virtamo, J., Albanes, D., 2002. Dietary carotenoids, serum β -carotene, and retinol and risk of lung cancer in the alpha-tocopherol, beta-carotene cohort study. *Am. J. Epidemiol.* 156, 536–547. <https://doi.org/10.1093/aje/kwf072>
- Hollstein, M., Sidransky, D., Vogelstein, B., Harris, C.C., 1991. p53 mutations in human cancers. *Science* (80-.). 253, 49–53.
- Holm, M., Hardtke, C.S., Gaudet, R., Deng, X.W., 2001. Identification of a structural motif that confers specific interaction with the WD40 repeat domain of *Arabidopsis* COP1. *EMBO J.* 20, 118–127. <https://doi.org/10.1093/emboj/20.1.118>
- Holm, M., Ma, L.G., Qu, L.J., Deng, X.W., 2002. Two interacting bZIP proteins are direct targets of COP1-mediated control of light-dependent gene expression in *Arabidopsis*. *Genes Dev.* 16, 1247–1259. <https://doi.org/10.1101/gad.969702>
- Holmes, M.G., Smith, H., 1977. The function of phytochrome in the natural environment- II. The influence of vegetation canopies on the spectral energy distribution of natural daylight. *Photochem. Photobiol.* 25, 539–545.

- Hong, S.H., Kim, H.J., Ryu, J.S., Choi, H., Jeong, S., Shin, J., Choi, G., Nam, H.G., 2008. CRY1 inhibits COP1-mediated degradation of BIT1, a MYB transcription factor, to activate blue light-dependent gene expression in Arabidopsis. *Plant J.* 55, 361–371. <https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2008.03508.x>
- Hood, J., Steven, H., 1969. Metabolism of Ascorbic-i in Experimental - ‘ 4C Acid Scurvy ’ 2.
- Hooper, L., Kroon, P.A., Rimm, E.B., Cohn, J.S., Harvey, I., Cornu, K.A. Le, Ryder, J.J., Hall, W.L., Cassidy, A., 2008. Flavonoids, flavonoid-rich foods, and cardiovascular risk: a meta-analysis of randomized controlled trials. *Am. J. Clin. Nutr.* 88, 38–50.
- Hopia, A., Heinonen, M., 1999. Antioxidant activity of flavonol aglycones and their glycosides in methyl linoleate. *J. Am. Oil Chem. Soc.* 76, 139–144. <https://doi.org/10.1007/s11746-999-0060-0>
- Hornitschek, P., Kohnen, M. V., Lorrain, S., Rougemont, J., Ljung, K., López-Vidriero, I., Franco-Zorrilla, J.M., Solano, R., Trevisan, M., Pradervand, S., Xenarios, I., Fankhauser, C., 2012. Phytochrome interacting factors 4 and 5 control seedling growth in changing light conditions by directly controlling auxin signaling. *Plant J.* 71, 699–711. <https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2012.05033.x>
- Hornitschek, P., Lorrain, S., Zoete, V., Michielin, O., Fankhauser, C., 2009. Inhibition of the shade avoidance response by formation of non-DNA binding bHLH heterodimers. *EMBO J.* 28, 3893–3902. <https://doi.org/10.1038/emboj.2009.306>
- Hosoda, K., Wang, M.F., Liao, M.L., Chuang, C.K., Iha, M., Clevidence, B., Yamamoto, S., 2003. Antihyperglycemic effect of oolong tea in type 2 diabetes. *Diabetes Care* 26, 1714–1718. <https://doi.org/10.2337/diacare.26.6.1714>
- Hou, X., Rivers, J., León, P., McQuinn, R.P., Pogson, B.J., 2016. Synthesis and function of apocarotenoid signals in plants. *Trends Plant Sci.* 21, 792–803. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2016.06.001>
- Hou, Y., Li, X., Sun, L., Qu, Z., Jiang, L., Du, Y., 2017. Phosphorus and mortality risk in end-stage renal disease: A meta-analysis. *Clin. Chim. Acta* 474, 108–113. <https://doi.org/10.1016/J.CCA.2017.09.005>
- Howard, L.R., Pandjaitan, N., Morelock, T., Gil, M.I., 2002. Antioxidant capacity and phenolic content of spinach as affected by genetics and growing season. *J. Agric. Food Chem.* 50, 5891–5896. <https://doi.org/10.1021/jf020507o>
- Hsieh, C.L., Yen, G.C., Chen, H.Y., 2005. Antioxidant activities of phenolic acids on ultraviolet radiation-induced erythrocyte and low density lipoprotein oxidation. *J. Agric. Food Chem.* 53, 6151–6155. <https://doi.org/10.1021/jf050707a>
- Hsieh, M.-H., Goodman, H.M., 2005. The Arabidopsis IspH homolog is involved in the plastid nonmevalonate pathway of isoprenoid biosynthesis. *Plant Physiol.* 138, 641–653. <https://doi.org/10.1104/pp.104.058735>
- Hu, X., Zhang, A., Zhang, J., Jiang, M., 2006. Absciscic acid is a key inducer of hydrogen peroxide production in leaves of maize plants exposed to water stress. *Plant Cell Physiol.* 47, 1484–1495. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcl014>
- Huang, L., Zhang, Hongcheng, Zhang, Huiyong, Deng, X.W., Wei, N., 2015. HY5 regulates nitrite reductase 1 (NIR1) and ammonium transporter1;2 (AMT1;2) in Arabidopsis seedlings. *Plant Sci.* 238, 330–339. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2015.05.004>
- Huang, X., Ouyang, X., Wang Deng, X., 2014. Beyond repression of photomorphogenesis: Role switching of COP/DET/FUS in light signaling. *Curr. Opin. Plant Biol.* 21, 96–103.

- Huang, Y.G., Ji, J.D., Hou, Q.N., 1996. A study on carcinogenesis of endogenous nitrite and nitrosamine, and prevention of cancer. *Mutat. Res. - Fundam. Mol. Mech. Mutagen.* 358, 7–14. [https://doi.org/10.1016/0027-5107\(96\)00087-5](https://doi.org/10.1016/0027-5107(96)00087-5)
- Hubbard, K.E., Webb, A.A.R., 2011. Circadian rhythms: FLOWERING LOCUS T extends opening hours. *Curr. Biol.* 21, R636–R638. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2011.06.058>
- Hughes, D.A., 2001. Dietary carotenoids and human immune function. *Nutrition* 17, 823–827. [https://doi.org/10.1016/S0899-9007\(01\)00638-4](https://doi.org/10.1016/S0899-9007(01)00638-4)
- Hughes, D.A., 1999. Effects of carotenoids on human immune function. *Proc. Nutr. Soc.* 58, 713–718. <https://doi.org/10.1017/s0029665199000932>
- Hughes, J.E., Morgan, D.C., Lambton, P.A., Black, C.R., Smith, H., 1984. Photoperiodic time signals during twilight. *Plant. Cell Environ.* 7, 269–277. <https://doi.org/10.1111/1365-3040.ep11589464>
- Hughes, N.M., Carpenter, K.L., Cook, D.K., Keidel, T.S., Miller, C.N., Neal, J.L., Sanchez, A., Smith, W.K., 2015. Effects of cumulus clouds on microclimate and shoot-level photosynthetic gas exchange in *Picea engelmannii* and *Abies lasiocarpa* at treeline, Medicine Bow Mountains, Wyoming, USA. *Agric. For. Meteorol.* 201, 26–37. <https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2014.10.012>
- Hulburt, E.O., 1953. Explanation of the brightness and color of the sky, particularly the twilight sky. *J. Opt. Soc. Am.* 43, 113–118. <https://doi.org/10.1364/josa.43.000113>
- Humble, G.D., Hsiao, T.C., 1970. Light-dependent influx and efflux of potassium of guard cells during stomatal opening and closing. *Plant Physiol.* 46, 483–487.
- Humble, G.D., Hsiao, T.C., 1969. Specific requirement of potassium for light-activated opening of stomata in epidermal strips. *Plant Physiol.* 44, 230–234.
- Huncharek, M., Muscat, J., Kupelnick, B., 2009. Colorectal cancer risk and dietary intake of calcium, vitamin D, and dairy products: A meta-analysis of 26,335 cases from 60 observational studies. *Nutr. Cancer* 61, 47–69. <https://doi.org/10.1080/01635580802395733>
- Huner, N.P.A., Öquist, G., Sarhan, F., 1998. Energy balance and acclimation to light and cold. *Trends Plant Sci.* 3, 224–230. [https://doi.org/10.1016/S1360-1385\(98\)01248-5](https://doi.org/10.1016/S1360-1385(98)01248-5)
- Hung, K.T., Cheng, D.G., Hsu, Y.T., Kao, C.H., 2008. Abscissic acid-induced hydrogen peroxide is required for anthocyanin accumulation in leaves of rice seedlings. *J. Plant Physiol.* 165, 1280–1287. <https://doi.org/10.1016/J.JPLPH.2007.10.008>
- Hunt, C.D., Johnson, L.K., 2007. Magnesium requirements: new estimations for men and women by cross-sectional statistical analyses of metabolic magnesium balance data. *Am. J. Clin. Nutr.* 86, 1054–1063. <https://doi.org/10.1093/ajcn/84.4.843>
- Hunt, J.R., 2003. Bioavailability of iron, zinc, and other trace minerals from vegetarian diets. *Am. J. Clin. Nutr.* 78, 633–639.
- Hunter, R.E., 1974. Inactivation of pectic enzymes by polyphenols in cotton seedlings of different ages infected with *Rhizoctonia solani*. *Physiol. Plant Pathol.* 4, 151–159. [https://doi.org/10.1016/0048-4059\(74\)90002-2](https://doi.org/10.1016/0048-4059(74)90002-2)
- Hunter, W.N., 2007. The non-mevalonate pathway of isoprenoid precursor biosynthesis. *J. Biol. Chem.* 282, 21573–21577. <https://doi.org/10.1074/jbc.R700005200>
- Hurley, J.H., Dean, A.M., Sohl, J.L., Koshland, D.E., Stroud, R.M., 1990. Regulation of an enzyme by phosphorylation at the active site. *Science* (80-.). 249, 1012–1016. <https://doi.org/10.1126/science.2204109>

- Hurrell, R., Egli, I., 2010. Iron bioavailability and dietary reference values. *Am. J. Clin. Nutr.* 91, 1461S-1467S. <https://doi.org/10.3945/ajcn.2010.28674F>.Am
- Hutter, B.Y.F., Kostial, K., 1954. Effect of magnesium and calcium ions on the release of acetylcholine. *J. Physiol.* 124, 234–241.
- Hwang, O., 2013. Role of oxidative stress in parkinson's disease. *Exp. Neurobiol.* 22, 11–17. <https://doi.org/10.5607/en.2013.22.1.11>
- Ibrahim, M.H., Jaafar, H.Z.E., Karimi, E., Ghasemzadeh, A., 2014. Allocation of secondary metabolites, photosynthetic capacity, and antioxidant activity of Kacip Fatimah (*Labisia pumila benth*) in response to CO₂ and light intensity. *Sci. World J.* 2014, 1–13. <https://doi.org/10.1155/2014/360290>
- Imlay, J.A., Chin, S.M., Linn, S., 1988. Toxic DNA damage by hydrogen peroxide through the fenton reaction in vivo and in vitro. *Science* (80-.). 240, 640–642.
- Ingemarsson, B., Oscarson, P., af Ugglas, M., Larsson, C.-M., 1987. Nitrogen Utilization in Lemna. *Plant Physiol.* 85, 860–864.
- Inoue, S., Kawanishi, S., 1995. Oxidative DNA damage induced by simultaneous generation of nitric oxide and superoxide. *FEBS Lett.* 371, 86–88. [https://doi.org/10.1016/0014-5793\(95\)00873-8](https://doi.org/10.1016/0014-5793(95)00873-8)
- Inoue, S., Kinoshita, T., Matsumoto, M., Nakayama, K.I., Doi, M., Shimazaki, K., 2008. Blue light-induced autophosphorylation of phototropin is a primary step for signaling. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 105, 5626–5631. <https://doi.org/10.1073/pnas.0709189105>
- Institute of Medicine, 2001. Dietary Reference Intakes for vitamin A, vitamin K, arsenic, boron, chromium, copper, iodine, iron, manganese, molybdenum, nickel, silicon, vanadium, and zinc.
- Institute of Medicine, 2000a. Dietary Reference Intakes for Vitamin C, Vitamin E, Selenium, and Carotenoids.
- Institute of Medicine, 2000b. Phosphorus. Diet. Ref. intakes calcium, phosphorus, magnesium, Vitam. D, fluoride. <https://doi.org/10.1111/j.1753-4887.1997.tb01621.x>
- Iqbal, M., 1983. An introduction to solar radiation. Academic Press Inc, New York, London. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-373750-2.X5001-0>
- Ireland, P., Fordtran, J.S., 1973. Effect of dietary calcium and age on jejunal calcium absorption in humans studied by intestinal perfusion. *J. Clin. Invest.* 52, 2672–2681. <https://doi.org/10.1172/JCI107461>
- Ito, S., Song, Y.H., Imaizumi, T., 2012. LOV domain-containing F-box proteins: Light-dependent protein degradation modules in Arabidopsis. *Mol. Plant* 5, 573–582. <https://doi.org/10.1093/mp/sss013>
- Iuchi, S., Kobayashi, M., Yamaguchi-Shinozaki, K., Shinozaki, K., 2002. A Stress-Inducible Gene for 9-cis-Epoxy-carotenoid Dioxygenase Involved in Absciscic Acid Biosynthesis under Water Stress in Drought-Tolerant Cowpea. *Plant Physiol.* 123, 553–562. <https://doi.org/10.1104/pp.123.2.553>
- Iwai, M., Ohta, M., Tsuchiya, H., Suzuki, T., 2010. Enhanced accumulation of caffeic acid, rosmarinic acid and luteolin-glucoside in red perilla cultivated under red diode laser and blue LED illumination followed by UV-A irradiation. *J. Funct. Foods* 2, 66–70. <https://doi.org/10.1016/J.JFF.2009.11.002>
- Iwashina, T., 2015. Contribution to flower colors of flavonoids including anthocyanins: A review. *Nat. Prod. Commun.* 10, 529–544.

- Jacobo-Velázquez, D.A., Cisneros-Zevallos, L., 2009. Correlations of antioxidant activity against phenolic content revisited: A new approach in data analysis for food and medicinal plants. *J. Food Sci.* 74, 107–113. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2009.01352.x>
- Jacoby, B., 1961. Calcium-magnesium ratios in the root medium as related to magnesium uptake by citrus seedlings. *Plant Soil* 15, 74–80. <https://doi.org/10.1007/BF01421750>
- Jacoby, M., Weisshaar, B., Dröge-Laser, W., Vicente-Carbajosa, J., Tiedemann, J., Kroj, T., Parcy, F., 2002. bZIP transcription factors in Arabidopsis. *Trends Plant Sci.* 7, 106–111. [https://doi.org/10.1016/s1360-1385\(01\)02223-3](https://doi.org/10.1016/s1360-1385(01)02223-3)
- Jakszyn, P., González, C.A., 2006. Nitrosamine and related food intake and gastric and oesophageal cancer risk: A systematic review of the epidemiological evidence. *World J. Gastroenterol.* 12, 4296–4303. <https://doi.org/10.3748/wjg.v12.i27.4296>
- Jang, I.-C., Henriques, R., Seo, H.S., Nagatani, A., Chua, N.-H., 2010. Arabidopsis PHYTOCHROME INTERACTING FACTOR Proteins Promote Phytochrome B Polyubiquitination by COP1 E3 Ligase in the Nucleus. *Plant Cell Online* 22, 2370–2383. <https://doi.org/10.1105/tpc.109.072520>
- Jang, I.C., Henriques, R., Chua, N.H., 2013. Three transcription factors, HFR1, LAF1 and HY5, regulate largely independent signaling pathways downstream of phytochrome A. *Plant Cell Physiol.* 54, 907–916. <https://doi.org/10.1093/pcp/pct042>
- Jang, Y.P., Zhou, J., Nakanishi, K., Sparrow, J.R., 2005. Anthocyanins protect against A2E photooxidation and membrane permeabilization in retinal pigment epithelial cells. *Photochem. Photobiol.* 81, 529–536. <https://doi.org/10.1111/j.1751-1097.2005.tb00221.x>
- Jansen, M.A.K., 2001. Phenol-Oxidizing Peroxidases Contribute to the Protection of Plants from Ultraviolet Radiation Stress. *Plant Physiol.* 126, 1012–1023. <https://doi.org/10.1104/pp.126.3.1012>
- Jansson, E.Å., Huang, L., Malkey, R., Govoni, M., Nihlén, C., Olsson, A., Stensdotter, M., Petersson, J., Holm, L., Weitzberg, E., Lundberg, J.O., 2008. A mammalian functional nitrate reductase that regulates nitrite and nitric oxide homeostasis. *Nat. Chem. Biol.* 4, 411–417. <https://doi.org/10.1038/nchembio.92>
- Jarrell, W.M., Beverly, R.B., 1981. The dilution effect in plant nutrition studies. *Adv. Agron.* 34, 197–222.
- Jáuregui-Zúñiga, D., Ferrer, M.A., Calderón, A.A., Muñoz, R., Moreno, A., 2005. Heavy metal stress reduces the deposition of calcium oxalate crystals in leaves of *Phaseolus vulgaris*. *J. Plant Physiol.* 162, 1183–1187. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2005.03.002>
- Jeandet, P., Delaunois, B., Conreux, A., Donnez, D., Nuzzo, V., Cordelier, S., Clément, C., Courot, E., 2010. Biosynthesis, metabolism, molecular engineering, and biological functions of stilbene phytoalexins in plants. *BioFactors* 36, 331–341. <https://doi.org/10.1002/biof.108>
- Jee, S.H.A., Miller, E.R., Guallar, E., Singh, V.K., Appel, L.J., Klag, M.J., 2002. The effect of magnesium supplementation on blood pressure: A meta-analysis of randomized clinical trials. *Am. J. Hypertens.* 15, 691–696. [https://doi.org/10.1016/S0895-7061\(02\)02964-3](https://doi.org/10.1016/S0895-7061(02)02964-3)
- Jehle, S., Hulter, H.N., Krapf, R., 2013. Effect of potassium citrate on bone density, microarchitecture, and fracture risk in healthy older adults without osteoporosis: a randomized controlled trial. *J. Clin. Endocrinol. Metab.* 98, 207–217. <https://doi.org/10.1210/jc.2012>
- Jenkins, G.I., 2014. The UV-B photoreceptor UVR8: from structure to physiology. *Plant Cell* 26, 21–37. <https://doi.org/10.1105/tpc.113.119446>
- Jenkinson, D.H., 1957. The nature of the antagonism between calcium and magnesium ions at

- the neuromuscular junction. *J. Physiol.* 138, 434–444.
- Jeong, S.W., Park, S., Jin, J.S., Seo, O.N., Kim, G.S., Kim, Y.H., Bae, H., Lee, G., Kim, S.T., Lee, W.S., Shin, S.C., 2012. Influences of four different light-emitting diode lights on flowering and polyphenol variations in the leaves of chrysanthemum (*chrysanthemum morifolium*). *J. Agric. Food Chem.* 60, 9793–9800. <https://doi.org/10.1021/jf302272x>
- Jess Tovar, M., Paz Romero, M., Girona, J., Jos Motilva, M., 2002. L-phenylalanine ammonia-lyase activity and concentration of phenolics in developing olive (*Olea europaea* L. cv Arbequina) fruit grown under different irrigation regimes. *J. Sci. Food Agric.* 82, 892–898. <https://doi.org/10.1002/jsfa.1122>
- Jia, K.-P., Luo, Q., He, S.-B., Lu, X.-D., Yang, H.-Q., 2014. Strigolactone-regulated hypocotyl elongation is dependent on cryptochrome and phytochrome signaling pathways in *Arabidopsis*. *Mol. Plant* 7, 528–540. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.126.1.78>
- Jiao, Y., Lau, O.S., Deng, X.W., 2007. Light-regulated transcriptional networks in higher plants. *Nat. Rev. Genet.* 8, 217–230. <https://doi.org/10.1038/nrg2049>
- Joh, T.H., Park, D.H., Reis, D.J., 1978. Direct phosphorylation of brain tyrosine hydroxylase by cyclic AMP-dependent protein kinase: Mechanism of enzyme activation. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 75, 4744–4748. <https://doi.org/10.1073/pnas.75.10.4744>
- Johansson, H., Jones, H.J., Foreman, J., Hemsted, J.R., Stewart, K., Grima, R., Halliday, K.J., 2014. *Arabidopsis* cell expansion is controlled by a photothermal switch. *Nat. Commun.* 5, 1–8. <https://doi.org/10.1038/ncomms5848>
- Johkan, M., Shoji, K., Goto, F., Hashida, S., nosuke, Yoshihara, T., 2010. Blue light-emitting diode light irradiation of seedlings improves seedling quality and growth after transplanting in red leaf lettuce. *HortScience* 45, 1809–1814.
- Johnson, G.N., 2011. Reprint of: Physiology of PSI cyclic electron transport in higher plants. *Biochim. Biophys. Acta - Bioenerg.* 1807, 906–911. <https://doi.org/10.1016/j.bbabi.2011.05.008>
- Johnson, M.A., Tekkanat, K., Schmaltz, S.P., Fox, I.H., 1989. Adenosine triphosphate turnover in humans. Decreased degradation during relative hyperphosphatemia. *J. Clin. Invest.* 84, 990–995. <https://doi.org/10.1172/JCI114263>
- Jones, D.L., Darrah, P.R., 1994. Role of root derived organic acids in the mobilization of nutrients from the rhizosphere. *Plant Soil* 166, 247–257.
- Jones, R.J., Mansfield, T.A., 1970. Suppression of stomatal opening in leaves treated with abscisic acid. *J. Exp. Bot.* 21, 714–719. <https://doi.org/10.1093/jxb/21.3.714>
- Jones, R.S., Mitchell, C.A., 1989. Calcium ion involvement in growth inhibition of mechanically stressed soybean (*Glycine max*) seedlings. *Physiol. Plant.* 76, 598–602. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1989.tb05485.x>
- Jongschaap, R.E.E., Dueck, T.A., Hemming, S., Marcelis, L.F.M., Marissen, N., 2006. Simulating seasonal patterns of increased greenhouse crop production by conversion of direct radiation into diffuse radiation. *Acta Hortic.* 718, 315–321. <https://doi.org/10.17660/acta-hortic.2006.718.36>
- Joshiyura, K.J., Ascherio, A., Manson, J.A.E., Stampfer, M.J., Rimm, E.B., Speizer, F.E., Hennekens, C.H., Spiegelman, D., Willett, W.C., 1999. Fruit and vegetable intake in relation to risk of ischemic stroke. *J. Am. Med. Assoc.* 282, 1233–1239. <https://doi.org/10.1001/jama.282.13.1233>
- Jung, J.-H., Klose, C., Box, M.S., Grant, A., Wigge, P.A., Biswas, S., Kumar, M., Jaeger, K.E.,

- Ezer, D., Khattak, A.K., Locke, J.C.W., Schäfer, E., Domijan, M., Charoensawan, V., Cortijo, S., Gao, M., 2016. Phytochromes function as thermosensors in *Arabidopsis*. *Science* (80-.). 354, 886–889. <https://doi.org/10.1126/science.aaf6005>
- Kabu, K.L., Toop, E.W., 1970a. Influence of potassium-magnesium antagonism on tomato plant growth. *Can. J. Plant Sci.* 50, 711–715.
- Kabu, K.L., Toop, E.W., 1970b. Influence of soil temperature and potassium fertilization on magnesium content of tomato plants. *Can. J. Plant Sci.* 50, 740–742.
- Kadomura-Ishikawa, Y., Miyawaki, K., Noji, S., Takahashi, A., 2013. Phototropin 2 is involved in blue light-induced anthocyanin accumulation in *Fragaria x ananassa* fruits. *J. Plant Res.* 126, 847–857. <https://doi.org/10.1007/s10265-013-0582-2>
- Kagawa, T., Sakai, T., Suetsugu, N., Oikawa, K., Ishiguro, S., Kato, T., Tabata, S., Okada, K., Wada, M., 2001. *Arabidopsis* NPL1: A phototropin homolog controlling the chloroplast high-light avoidance response. *Science* (80-.). 291, 2138–2141. <https://doi.org/10.1126/science.291.5511.2138>
- Kalantari, F., Mohd Tahir, O., Akbari Joni, R., Fatemi, E., 2018. Opportunities and challenges in sustainability of vertical farming: A review. *J. Landsc. Ecol.* 11, 35–60. <https://doi.org/10.1515/jlecol-2017-0016>
- Kallner, A., Hartmann, D., Hornig, D., 1979. Steady-state turnover and body pool of ascorbic acid in man. *Am. J. Clin. Nutr.* 32, 530–539.
- Kaltenbach, M., Schröder, G., Schmelzer, E., Lutz, V., Schröder, J., 1999. Flavonoid hydroxylase from *Catharanthus roseus*: cDNA, heterologous expression, enzyme properties and cell-type specific expression in plants. *Plant J.* 19, 183–193. <https://doi.org/10.1046/j.1365-313X.1999.00524.x>
- Kämmerling, D., Döhring, S., Arndt, C., Andersson, R., 2017. Tageslicht im Stall – Anforderungen an das Spektrum von Lichtquellen bei Geflügel. *Berl. Munch. Tierarztl. Wochenschr.* 130, 210–221. <https://doi.org/10.2376/0005-9366-16034>
- Kampfenkel, K., Van Montagu, M., Inze, D., 1995. Effects of iron excess on *Nicotiana glauca* plants. *Plant Physiol.* 107, 725–735. <https://doi.org/10.1104/pp.107.3.725>
- Kang, C.-Y., Lian, H.-L., Wang, F.-F., Huang, J.-R., Yang, H.-Q., 2009. Cryptochromes, phytochromes, and COP1 regulate light-controlled stomatal development in *Arabidopsis*. *Plant Cell* 21, 2624–2641. <https://doi.org/10.1105/tpc.109.069765>
- Kang, D.J., Seo, Y.J., Lee, J.D., Ishii, R., Kim, K.U., Shin, D.H., Park, S.K., Jang, S.W., Lee, I.J., 2005a. Jasmonic acid differentially affects growth, ion uptake and abscisic acid concentration in salt-tolerant and salt-sensitive rice cultivars. *J. Agron. Crop Sci.* 191, 273–282. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2005.00153.x>
- Kang, M.Y., Kwon, H.Y., Kim, N.Y., Sakuraba, Y., Paek, N.C., 2015. CONSTITUTIVE PHOTOMORPHOGENIC 10 (COP10) contributes to floral repression under non-inductive short days in *Arabidopsis*. *Int. J. Mol. Sci.* 16, 26493–26505. <https://doi.org/10.3390/ijms161125969>
- Kang, M.Y., Yoo, S.C., Kwon, H.Y., Lee, B.D., Cho, J.N., Noh, Y.S., Paek, N.C., 2015b. Negative regulatory roles of DE-ETIOLATED1 in flowering time in *Arabidopsis*. *Sci. Rep.* 5, 1–8. <https://doi.org/10.1038/srep09728>
- Kang, X., Chong, J., Ni, M., 2005. HYPERSENSITIVE TO RED AND BLUE 1, a ZZ-type zinc finger protein, regulates phytochrome B-mediated red and cryptochrome-mediated blue light responses. *Plant Cell* 17, 822–835. <https://doi.org/10.1105/tpc.104.029165>

- Kang, X., Ni, M., 2006. Arabidopsis SHORT HYPOCOTYL UNDER BLUE1 contains SPX and EXS domains and acts in cryptochrome signaling. *Plant Cell* 18, 921–934. <https://doi.org/10.1105/tpc.105.037879>
- Kang, X., Zhou, Y., Sun, X., Ni, M., 2007. Hypersensitive to red and blue 1 and its C-terminal regulatory function control FLOWERING LOCUS T expression. *Plant J.* 52, 937–948. <https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2007.03295.x>
- Kapil, V., Khambata, R.S., Robertson, A., Caulfield, M.J., Ahluwalia, A., 2015. Dietary nitrate provides sustained blood pressure lowering in hypertensive patients: A randomized, phase 2, double-blind, placebo-controlled study. *Hypertension* 65, 320–327. <https://doi.org/10.1161/HYPERTENSIONAHA.114.04675>
- Kapulnik, Y., Delaux, P.M., Resnick, N., Mayzlish-Gati, E., Wininger, S., Bhattacharya, C., Séjalon-Delmas, N., Combier, J.P., Bécard, G., Belausov, E., Beeckman, T., Dor, E., Hershenhorn, J., Koltai, H., 2011. Strigolactones affect lateral root formation and root-hair elongation in Arabidopsis. *Planta* 233, 209–216. <https://doi.org/10.1007/s00425-010-1310-y>
- Karageorgou, P., Manetas, Y., 2006. The importance of being red when young: Anthocyanins and the protection of young leaves of *Quercus coccifera* from insect herbivory and excess light. *Tree Physiol.* 26, 613–621. <https://doi.org/10.1093/treephys/26.5.613>
- Karayekov, E., Sellaro, R., Legris, M., Yanovsky, M.J., Casal, J.J., 2013. Heat shock-induced fluctuations in clock and light signaling enhance phytochrome B-mediated Arabidopsis deetiolation. *Plant Cell* 25, 2892–2906. <https://doi.org/10.1105/tpc.113.114306>
- Karkleliene, R., Dambrauskienė, E., Juškevičienė, D., Radzevičius, A., Rubinskiene, M., Viškelis, P., 2014. Productivity and nutritional value of dill and parsley. *Hortic. Sci.* 41, 131–137. <https://doi.org/10.17221/240/2013-hortsci>
- Karnachuk, R.A., Golovatskaya, I.F., Efimova, M. V., Khripach, V.A., 2002. The effect of epibrassinolide on Arabidopsis seedling morphogenesis and hormonal balance under green light. *Russ. J. Plant Physiol.* 49, 530–533. <https://doi.org/10.1023/A:1016372228174>
- Karnachuk, R.A., Tishchenko, S.Y., Golovatskaya, I.F., 2001. Endogenous phytohormones and regulation of morphogenesis of Arabidopsis thaliana by blue light. *Russ. J. Plant Physiol.* 48, 226–230. <https://doi.org/10.1023/A:1009060302835>
- Karniol, B., Chamovitz, D.A., 2000. The COP9 signalosome: from light signaling to general developmental regulation and back. *Curr. Opin. Plant Biol.* 3, 387–393.
- Karppinen, K., Zoratti, L., Sarala, M., Carvalho, E., Hirsimäki, J., Mentula, H., Martens, S., Häggman, H., Jaakola, L., 2016. Carotenoid metabolism during bilberry (*Vaccinium myrtillus* L.) fruit development under different light conditions is regulated by biosynthesis and degradation. *BMC Plant Biol.* 16, 1–16. <https://doi.org/10.1186/s12870-016-0785-5>
- Kasai, H., 1997. Analysis of a form of oxidative DNA damage, 8-hydroxy-2'-deoxyguanosine, as a marker of cellular oxidative stress during carcinogenesis. *Mutat. Res.* 387, 147–163. <https://doi.org/10.5220/0002383304280431>
- Kasperbauer, M.J., 1987. Far-red light reflection from green leaves and effects on phytochrome-mediated assimilate partitioning under field conditions. *Plant Physiol.* 85, 350–354. <https://doi.org/10.1104/pp.85.2.350>
- Kasperbauer, M.J., 1971. Spectral distribution of light in a tobacco canopy and effects of end-of-day light quality on growth and development. *Plant Physiol.* 47, 775–778. <https://doi.org/10.1104/pp.47.6.775>

- Kasperbauer, M.J., Hunt, P.G., Sojka, R.E., 1984. Photosynthate partitioning and nodule formation in soybean plants that received red or far-red light at the end of the photosynthetic period. *Physiol. Plant.* 61, 549–554. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1984.tb05168.x>
- Kassebaum, N.J., Jasrasaria, R., Naghavi, M., Wulf, S.K., Johns, N., Lozano, R., Regan, M., Weatherall, D., Chou, D.P., Eisele, T.P., Flaxman, S.R., Pullan, R.L., Brooker, S.J., Murray, C.J.L., 2015. Red cells, iron, and erythropoiesis: A systematic analysis of global anemia burden from 1990 to 2010. *Blood J.* 123, 615–625. <https://doi.org/10.1182/blood-2013-06-508325>.The
- Katiyar, S.K., Afaq, F., Perez, A., Mukhtar, H., 2001. Green tea polyphenol (–)-epigallocatechin-3-gallate treatment of human skin inhibits ultraviolet radiation-induced oxidative stress. *Carcinogenesis* 22, 287–294.
- Kaushik, P., Gorin, F., Vali, S., 2007. Dynamics of tyrosine hydroxylase mediated regulation of dopamine synthesis. *J. Comput. Neurosci.* 22, 147–160. <https://doi.org/10.1007/s10827-006-0004-8>
- Kawanishi, S., Hiraku, Y., Oikawa, S., 2001. Mechanism of guanine-specific DNA damage by oxidative stress and its role in carcinogenesis and aging. *Mutat. Res. - Rev. Mutat. Res.* 488, 65–76. [https://doi.org/10.1016/S1383-5742\(00\)00059-4](https://doi.org/10.1016/S1383-5742(00)00059-4)
- Kawoosa, T., Singh, H., Kumar, A., Sharma, S.K., Devi, K., Dutt, S., Vats, S.K., Sharma, M., Ahuja, P.S., Kumar, S., 2010. Light and temperature regulated terpene biosynthesis: Hepatoprotective monoterpene picroside accumulation in *Picrorhiza kurroa*. *Funct. Integr. Genomics* 10, 393–404. <https://doi.org/10.1007/s10142-009-0152-9>
- Kelber, A., Vorobyev, M., Osorio, D., 2003. Animal colour vision - Behavioural tests and physiological concepts. *Biol. Rev. Camb. Philos. Soc.* 78, 81–118. <https://doi.org/10.1017/S1464793102005985>
- Keller, M.M., Jaillais, Y., Pedmale, U. V., Moreno, J.E., Chory, J., Ballaré, C.L., 2011. Cryptochrome 1 and phytochrome B control shade-avoidance responses in *Arabidopsis* via partially independent hormonal cascades. *Plant J.* 67, 195–207. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3113.2011.04598.x>
- Kelly, D., Coen, R.F., Akuffo, K.O., Beatty, S., Dennison, J., Moran, R., Stack, J., Howard, A.N., Mulcahy, R., Nolan, J.M., 2015. Cognitive function and its relationship with macular pigment optical density and serum concentrations of its constituent carotenoids. *J. Alzheimer's Dis.* 48, 261–277. <https://doi.org/10.3233/JAD-150199>
- Kemi, V.E., Kärkkäinen, M.U.M., Rita, H.J., Laaksonen, M.M.L., Outila, T.A., Lamberg-Al-lardt, C.J.E., 2010. Low calcium:phosphorus ratio in habitual diets affects serum parathyroid hormone concentration and calcium metabolism in healthy women with adequate calcium intake. *Br. J. Nutr.* 103, 561–568. <https://doi.org/10.1017/S0007114509992121>
- Kende, H., Lang, A., 1964. Gibberellins and light inhibition of stem growth in peas. *Plant Physiol.* 39, 435–440. <https://doi.org/10.1104/pp.39.3.435>
- Kerstetter, J.E., O'Brien, K.O., Insogna, K.L., 1998. Dietary protein affects intestinal calcium absorption. *Am. J. Clin. Nutr.* 68, 859–865.
- Kesse-Guyot, E., Fezeu, L., Andreeva, V.A., Touvier, M., Scalbert, A., Hercberg, S., Galan, P., 2012. Total and specific polyphenol intakes in midlife are associated with cognitive function measured 13 years later. *J. Nutr.* 142, 76–83. <https://doi.org/10.3945/jn.111.144428>
- Keuskamp, D.H., Keller, M.M., Ballaré, C.L., Pierik, R., 2012. Blue light regulated shade avoidance. *Plant Signal. Behav.* 7, 514–517. <https://doi.org/10.4161/psb.19340>

- Keuskamp, D.H., Sasidharan, R., Vos, I., Peeters, A.J.M., Voesenek, L.A.C.J., Pierik, R., 2011. Blue-light-mediated shade avoidance requires combined auxin and brassinosteroid action in *Arabidopsis* seedlings. *Plant J.* 67, 208–217. <https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2011.04597.x>
- Khachik, F., Beecher, G.R., Smith, J.C., 1995. Lutein, lycopene, and their oxidative metabolites in chemoprevention of cancer. *J. Cell. Biochem.* 59, 236–246. <https://doi.org/10.1002/jcb.240590830>
- Khanna, R., Shen, Y., Marion, C.M., Tsuchisaka, A., Theologis, A., Schafer, E., Quail, P.H., 2007. The basic helix-loop-helix transcription factor PIF5 acts on ethylene biosynthesis and phytochrome signaling by distinct mechanisms. *Plant Cell Online* 19, 3915–3929. <https://doi.org/10.1105/tpc.107.051508>
- Kianbakht, S., Abasi, B., Dabaghian, F.H., 2013. Anti-hyperglycemic effect of vaccinium arctostaphylos in type 2 diabetic patients: A randomized controlled trial. *Forsch. Komplementarmed.* 20, 17–22. <https://doi.org/10.1159/000346607>
- Kim, H.H., Goins, G.D., Wheeler, R.M., Sager, J.C., 2004a. Stomatal conductance of lettuce grown under or exposed to different light qualities. *Ann. Bot.* 94, 691–697. <https://doi.org/10.1093/aob/mch192>
- Kim, H.H., Goins, G.D., Wheeler, R.M., Sager, J.C., 2004b. Green-light supplementation for enhanced lettuce growth under red-and blue-light-emitting diodes. *HortScience* 39, 1617–1622.
- Kim, J.-S., Kwon, C.-S., Son, K.H., 2000. Inhibition of alpha-glucosidase and amylase by luteolin. *Biosci. Biotechnol. Biochem.* 64, 2458–2461.
- Kim, K., Kook, H.-S., Jang, Y.-J., Lee, W.-H., Kamala-Kannan, S., Chae, J.-C., Lee, K.-J., 2013. The effect of blue-light-emitting diodes on antioxidant properties and resistance to *Botrytis cinerea* in tomato. *J. Plant Pathol. Microbiol.* 4, 1–5. <https://doi.org/10.4172/2157-7471.1000203>
- Kim, K., Portis, A.R., 2004. Oxygen-dependent H₂O₂ production by Rubisco. *FEBS Lett.* 571, 124–128. <https://doi.org/10.1016/j.febslet.2004.06.064>
- Kim, M.J., Kim, H., 2015. Anticancer Effect of Lycopene in Gastric Carcinogenesis. *J. Cancer Prev.* 20, 92–96. <https://doi.org/10.15430/jcp.2015.20.2.92>
- Kim, Y.J., Kim, Y.B., Li, X., Choi, S.R., Park, S., Park, J.S., Lim, Y.P., Park, S.U., 2015. Accumulation of phenylpropanoids by white, blue, and red light irradiation and their organ-specific distribution in chinese cabbage (*Brassica rapa* ssp. *pekinensis*). *J. Agric. Food Chem.* 63, 6772–6778. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b02086>
- King, B.J., Siddiqi, M.Y., Glass, A.D.M., 1992. Studies of the uptake of nitrate in barley. *Plant Physiol.* 99, 1582–1589. <https://doi.org/10.1104/pp.99.4.1582>
- Kinoshita, T., Doi, M., Suetsugu, N., Kagawa, T., Wada, M., Shimazaki, K., 2001. Phot1 and phot2 mediate blue light regulation of stomatal opening. *Nature* 414, 656–660.
- Kinoshita, T., Ono, N., Hayashi, Y., Morimoto, S., Nakamura, S., Soda, M., Kato, Y., Ohnishi, M., Nakano, T., Inoue, S.I., Shimazaki, K.I., 2011. FLOWERING LOCUS T regulates stomatal opening. *Curr. Biol.* 21, 1232–1238. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2011.06.025>
- Kircher, S., Gil, P., Kozma-Bognar, L., Fejes, E., Speth, V., Husselstein-Muller, T., Bauer, D., Adam, E., Schäfer, E., Nagy, F., 2002. Nucleocytoplasmic partitioning of the plant photoreceptors phytochrome A, B, C, D, and E is regulated differentially by light and exhibits a diurnal rhythm. *Plant Cell* 14, 1541–1555. <https://doi.org/10.1105/tpc.001156>

- Kittas, C., Katsoulas, N., Katsoupa, M., Papaioannou, C., 2012. Test of a greenhouse covered by polyethylene film that reflects near-infrared radiation. *Acta Hortic.* 956, 507–514. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.956.60>
- Kleemann, R., Verschuren, L., Morrison, M., Zadelaar, S., van Erk, M.J., Wielinga, P.Y., Kooistra, T., 2011. Anti-inflammatory, anti-proliferative and anti-atherosclerotic effects of quercetin in human in vitro and in vivo models. *Atherosclerosis* 218, 44–52. <https://doi.org/10.1016/J.ATHEROSCLEROSIS.2011.04.023>
- Klein, J.D., Ferguson, I.B., 1987. Effect of high temperature on calcium uptake by suspension-cultured pear fruit cells. *Plant Cell Physiol.* 84, 153–156.
- Klein, R.M., Edsall, P.C., Gentile, A.C., 1965. Effects of near ultraviolet and green radiations on plant growth. *Plant Physiol.* 40, 903–906.
- Knecht, G.N., O’Leary, J.W., 1972. The effect of light intensity on stomate number and density of *Phaseolus vulgaris* L. leaves. *Int. J. Plant Sci.* 133, 132–134.
- Knekt, P., Jarvinen, R., Reunanen, A., Maatela, J., 1996. Flavonoid intake and coronary mortality in Finland: a cohort study. *BMJ* 312, 478–481. <https://doi.org/10.1136/bmj.312.7029.478>
- Knekt, P., Kumpulainen, J., Järvinen, R., Rissanen, H., Heliövaara, M., Reunanen, A., Hakulinen, T., Aromaa, A., 2002. Flavonoid intake and risk of chronic diseases. *Am. J. Clin. Nutr.* 76, 560–568.
- Knight, H., 2000. Calcium Signaling during abiotic stress in plants, in: Jeon, K.W. (Ed.), *International Review of Cytology: A Survey of Cell Biology*. Academic Press, San Diego, San Francisco, New York, Boston, London, Sydney, Tokyo, pp. 269–313.
- Knowles, L., Trimble, M.R., Knowles, N.R., 2001. Phosphorus status affects postharvest respiration, membrane permeability and lipid chemistry of European seedless cucumber fruit (*Cucumis sativus* L.). *Postharvest Biol. Technol.* 21, 179–188. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(00\)00144-7](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(00)00144-7)
- Kobayashi, S., Ishimaru, M., Hiraoka, K., Honda, C., 2002. Myb -related genes of the Kyoho grape (*Vitis labruscana*) regulate anthocyanin biosynthesis. *Planta* 215, 924–933. <https://doi.org/10.1007/s00425-002-0830-5>
- Kobayashi, T., Nishizawa, N.K., 2012. Iron uptake, translocation, and regulation in higher plants. *Annu. Rev. Plant Biol.* 63, 131–152. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042811-105522>
- Koch, K., Mengel, K., 1974. The influence of the level of potassium supply to young tobacco plants (*Nicotiana tabacum* L.) on short-term uptake and utilization of nitrate nitrogen (15N). *J. Sci. Food Agric.* 25, 465–471.
- Koes, R.E., Spelt, C.E., Mol, J.N.M., 1989. The chalcone synthase multigene family of *Petunia hybrida* (V30): differential, light-regulated expression during flower development and UV light induction. *Plant Mol. Biol.* 12, 213–225. <https://doi.org/10.1007/BF00020506>
- Kohlen, W., Charnikhova, T., Lammers, M., Pollina, T., Tóth, P., Haider, I., Pozo, M.J., de Maagd, R.A., Ruyter-Spira, C., Bouwmeester, H.J., López-Ráez, J.A., 2012. The tomato carotenoid cleavage dioxygenase8 (SlCCD8) regulates rhizosphere signaling, plant architecture and affects reproductive development through strigolactone biosynthesis. *New Phytol.* 196, 535–547. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04265.x>
- Koini, M.A., Alvey, L., Allen, T., Tilley, C.A., Harberd, N.P., Whitlam, G.C., Franklin, K.A.,

2009. High temperature-mediated adaptations in plant architecture require the bHLH transcription factor PIF4. *Curr. Biol.* 19, 408–413. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2009.01.046>
- Kolb, C.A., Käser, M.A., Kopeck, J., Zotz, G., Riederer, M., Pfündel, E.E., 2001. Effects of natural intensities of visible and ultraviolet radiation on epidermal ultraviolet screening and photosynthesis in grape leaves. *Plant Physiol.* 127, 863–875. <https://doi.org/10.1104/pp.010373>
- Koltai, H., 2013. Strigolactones activate different hormonal pathways for regulation of root development in response to phosphate growth conditions. *Ann. Bot.* 112, 409–415. <https://doi.org/10.1093/aob/mcs216>
- Konstantopoulou, E., Kapotis, G., Salachas, G., Petropoulos, S.A., Karapanos, I.C., Passam, H.C., 2010. Nutritional quality of greenhouse lettuce at harvest and after storage in relation to N application and cultivation season. *Sci. Hortic. (Amsterdam)*. 125, 93–94. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2010.03.003>
- Kopsell, D.A., Sams, C.E., 2013. Increases in shoot tissue pigments, glucosinolates, and mineral elements in sprouting broccoli after exposure to short-duration blue light from light emitting diodes. *J. Am. Hortic. Sci.* 138, 31–37.
- Kopsell, D.A., Sams, C.E., Barickman, T.C., Morrow, R.C., 2014. Sprouting broccoli accumulate higher concentrations of nutritionally important metabolites under narrow-band light-emitting diode lighting. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 139, 469–477.
- Körner, C., 2006. Significance of temperature in plant life, in: Morison, J.I.L., Morecroft, M.D. (Ed.), *Plant Growth and Climate Change*. Blackwell Publishing Ltd., Oxford, Ames, Carlton, pp. 48–69.
- Kostman, T.A., Franceschi, V.R., 2000. Cell and calcium oxalate crystal growth is coordinated to achieve high-capacity calcium regulation in plants. *Protoplasma* 214, 166–179. <https://doi.org/10.1007/BF01279061>
- Kotake-Nara, E., Kushiro, M., Zhang, H., Sugawara, T., Miyashita, K., Nagao, A., 2018. Carotenoids Affect Proliferation of Human Prostate Cancer Cells. *J. Nutr.* 131, 3303–3306. <https://doi.org/10.1093/jn/131.12.3303>
- Kowaltowski, A.J., Costa, A.D.T., Vercesi, A.E., 1998. Activation of the potato plant uncoupling mitochondrial protein inhibits reactive oxygen species generation by the respiratory chain. *FEBS Lett.* 425, 213–216. [https://doi.org/10.1016/S0014-5793\(98\)00231-2](https://doi.org/10.1016/S0014-5793(98)00231-2)
- Koyama, K., Ikeda, H., Poudel, P.R., Goto-Yamamoto, N., 2012. Light quality affects flavonoid biosynthesis in young berries of Cabernet Sauvignon grape. *Phytochemistry* 78, 54–64. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2012.02.026>
- Kozukue, N., Kozukue, E., Kishiguchi, M., 1979. Changes in the contents of phenolic substances, PAL and TAL accompanying chilling-injury of eggplant fruit. *Sci. Hortic. (Amsterdam)*. 11, 51–59.
- Krayenbuehl, P.-A., Battegay, E., Breymann, C., Furrer, J., Schulthess, G., 2011. Intravenous iron for the treatment of fatigue in nonanemic, premenopausal women with low serum ferritin concentration. *Blood* 118, 3222–3227. <https://doi.org/10.1182/blood-2011-04-346304>
- Krebs, H.A., 1953. The Sheffield experiment on the vitamin C requirement of human adults. *Proc. Nutr. Soc.* 12, 237–246. <https://doi.org/10.1111/j.1753-4887.1954.tb03255.x>
- Kreimer, G., Melkonian, M., Holtum, J.A., Latzko, E., 1988. Stromal free calcium concentration and light-mediated activation of chloroplast fructose-1,6-bisphosphatase. *Plant Physiol.* 86, 423–428. <https://doi.org/10.1104/pp.86.2.423>

- Krems, C., Walter, C., Heuer, T., Hoffmann, I., 2013. Nationale Verzehrsstudie II Lebensmittelverzehr und Nährstoffzufuhr auf Basis von 24h-Recalls. Max Rubner-Institut, Bundesforschungsinstitut für Ernährung und Leb. 1–12.
- Krieger-Liszka, A., Fufezan, C., Trebst, A., 2008. Singlet oxygen production in photosystem II and related protection mechanism. *Photosynth. Res.* 98, 551–564. <https://doi.org/10.1007/s11120-008-9349-3>
- Krinsky, N.I., 2001. Carotenoids as antioxidants. *Nutrition* 17, 815–817. [https://doi.org/10.1016/S0899-9007\(01\)00651-7](https://doi.org/10.1016/S0899-9007(01)00651-7)
- Krol, M., Gray, G.R., Huner, N.P.A., V.M., H., Öquist, G., Malek, L., 1995. Low-temperature stress and photoperiod affect an increased tolerance to photoinhibition in *Pinus banksiana* seedlings. *Can. J. Bot.* 73, 1119–1127.
- Kross, B.C., Ayebo, A.D., Fuortes, L.J., 1992. Methemoglobinemia: nitrate toxicity in rural America. *Am. Fam. Physician* 46, 183–188.
- Krutmann, J., 2000. UVA radiatio-induced biological effects in human skin: relevance for photoageing and photodermatosis. *J. Dermatol. Sci.* 23, 22–26.
- Kryston, T.B., Georgiev, A.B., Pissis, P., 2011. Role of oxidative stress and DNA damage in human carcinogenesis. *Mutat. Res. Mol. Mech. Mutagen.* 711, 193–201. <https://doi.org/10.1016/J.MRFMMM.2010.12.016>
- Kubota, C., Chia, P., Yang, Z., Li, Q., 2012. Applications of far-red light emitting diodes in plant production under controlled environments. *Acta Hortic.* 952, 59–66. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.952.4>
- Kuczera, J., 1987. Die Entdeckung der Radiowellen, in: Heinrich Hertz. pp. 42–62.
- Kuhn, B.M., Geisler, M., Bigler, L., Ringli, C., 2011. Flavonols accumulate asymmetrically and affect auxin transport in *Arabidopsis*. *Plant Physiol.* 156, 585–595. <https://doi.org/10.1104/pp.111.175976>
- Kulick, D.L., Hong, R., Ryzen, E., Rude, R.K., Rubin, J.N., Elkayam, U., Rahimtoola, S.H., Bhandari, A.K., 1988. Electrophysiologic effects of intravenous magnesium in patients with normal conduction systems and no clinical evidence of significant cardiac disease. *Am. Heart J.* 115, 367–373.
- Kumar, S.V., Lucyshyn, D., Jaeger, K.E., Alós, E., Alvey, E., Harberd, N.P., Wigge, P.A., 2016. PHYTOCHROME INTERACTING FACTOR4 controls the thermosensory activation of flowering. *Nature* 484, 242–245. <https://doi.org/10.1038/nature10928>. PHYTOCHROME
- Kuno, N., 2003. The Novel MYB Protein EARLY-PHYTOCHROME-RESPONSIVE1 Is a Component of a Slave Circadian Oscillator in *Arabidopsis*. *Plant Cell* 15, 2476–2488. <https://doi.org/10.1105/tpc.014217>
- Kuo-Huang, L.L., Ku, M.S.B., Franceschi, V.R., 2007. Correlations between calcium oxalate crystals and photosynthetic activities in palisade cells of shade-adapted *Peperomia glabella*. *Bot. Stud.* 48, 155–164.
- Kuriso, G., Zhang, H., Smith, J.L., Cramer, W.A., 2003. Structure of the cytochrome b6f complex of oxygenic photosynthesis: tuning the cavity. *Science* (80-.). 302, 1009–1014. https://doi.org/10.1007/978-94-017-7481-9_15
- Kuriyama, S., Hozawa, A., Ohmori, K., Shimazu, T., Matsui, T., Ebihara, S., Awata, S., Nagatomi, R., Arai, H., Tsuji, I., 2006. Green tea consumption and cognitive function: A cross-sectional study from the Tsurugaya Project. *Am. J. Clin. Nutr.* 83, 355–361.

- Lacis, A.A., Hansen, J.E., 1974. A parameterization for absorption of solar radiation in the Earth's atmosphere. *J. Atmos. Sci.* [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1974\)031<0118:APF-TAO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1974)031<0118:APF-TAO>2.0.CO;2)
- Lademann, J., Schanzer, S., Meinke, M., Sterry, W., Darvin, M.E., 2011. Interaction between carotenoids and free radicals in human skin. *Skin Pharmacol. Physiol.* 24, 238–244. <https://doi.org/10.1159/000326074>
- Lago, J.H.G., Ramos, C.S., Casanova, D.C.C., Morandim, A.D.A., Bergamo, D.C.B., Cavaleiro, A.J., Bolzani, V.D.S., Furlan, M., Guimarães, E.F., Young, M.C.M., Kato, M.J., 2004. Benzoic acid derivatives from Piper species and their fungitoxic activity against *Cladosporium cladosporioides* and *C. sphaerospermum*. *J. Nat. Prod.* 67, 1783–1788. <https://doi.org/10.1021/np030530j>
- Lagrimini, L.M., 1991. Wound-induced deposition of polyphenols in transgenic plants overexpressing peroxidase. *Plant Physiol.* 96, 577–583. <https://doi.org/10.1104/pp.96.2.577>
- Lahiri, S.D., Zhang, G., Dunaway-Mariano, D., Allen, K.N., 2003. The pentacovalent phosphorus intermediate of a phosphoryl. *Science* (80-.). 299, 2067–2072.
- Lai, B., Hu, B., Qin, Y.H., Zhao, J.T., Wang, H.C., Hu, G.B., 2015. Transcriptomic analysis of *Litchi chinensis* pericarp during maturation with a focus on chlorophyll degradation and flavonoid biosynthesis. *BMC Genomics* 16, 1–18. <https://doi.org/10.1186/s12864-015-1433-4>
- Lai, T.-S., Slaughter, T.F., Peoples, K.A., Hettasch, J.M., Greenberg, C.S., 1998. Regulation of human tissue transglutaminase function by magnesium-nucleotide complexes. *J. Biol. Chem.* 273, 1776–1781. <https://doi.org/10.1074/jbc.273.3.1776>
- Lainé, P., Ourry, A., Boucaud, J., 1995. Shoot control of nitrate uptake rates by roots of *Brassica napus* L.: Effects of localized nitrate supply. *Planta* 196, 77–83. <https://doi.org/10.1007/BF00193220>
- Laing, W., Norling, C., Brewster, D., Wright, M., Bulley, S., 2017. Ascorbate concentration in *Arabidopsis thaliana* and expression of ascorbate related genes using RNAseq in response to light and the diurnal cycle. *bioRxiv* 138008.
- Laisk, A., Eichelmann, H., Oja, V., Rasulov, B., Padu, E., Bichele, I., Pettai, H., Kull, O., 2005. Adjustment of leaf photosynthesis to shade in a natural canopy: Rate parameters. *Plant, Cell Environ.* 28, 389–401. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2004.01274.x>
- Laisk, A., Oja, V., Eichelmann, H., Dall'Osto, L., 2014. Action spectra of photosystems II and I and quantum yield of photosynthesis in leaves in state 1. *Biochim. Biophys. Acta - Bioenerg.* 1837, 315–325. <https://doi.org/10.1016/j.bbabi.2013.12.001>
- Lambert, H., Frassetto, L., Moore, J.B., Torgerson, D., Gannon, R., Burckhardt, P., Lanham-New, S., 2015. The effect of supplementation with alkaline potassium salts on bone metabolism: a meta-analysis. *Osteoporos. Int.* 26, 1311–1318. <https://doi.org/10.1007/s00198-014-3006-9>
- Landmesser, U., Spiekermann, S., Dikalov, S., Tatge, H., Wilke, R., Kohler, C., Harrison, D.G., Hornig, B., Drexler, H., 2002. Vascular oxidative stress and endothelial dysfunction in patients with chronic heart failure. *Circulation* 106, 3073–3078. <https://doi.org/10.1161/01.cir.0000041431.57222.af>
- Landry, L.G., Chapple, C., Last, R.L., 1995. *Arabidopsis* Mutants Lacking Phenolic Sunscreens Exhibit Enhanced Ultraviolet-B Injury and Oxidative Damage. *Plant Physiol.* 109, 1159–1166. <https://doi.org/10.1104/pp.109.4.1159>

- Lange, H., Shropshimr, W., Mohr, A.H., 1971. An analysis of phytochrome-mediated anthocyanin synthesis. *Plant Physiol.* 47, 649–655.
- Langebartels, C., Wohlgemuth, H., Kschieschan, S., Grün, S., Sandermann, H., 2002. Oxidative burst and cell death in ozone-exposed plants. *Plant Physiol. Biochem.* 40, 567–575. [https://doi.org/10.1016/S0981-9428\(02\)01416-X](https://doi.org/10.1016/S0981-9428(02)01416-X)
- Langendorf, H., 1965. Mineralstoffe und Spurenelemente, in: *Die Bestandteile Der Lebensmittel*. pp. 123–166.
- Lara, R.S., Matson, G.B., Hugg, J.W., Maudsley, A.A., Weiner, M.W., 1993. Quantitation of in vivo phosphorus metabolites in human brain with magnetic resonance spectroscopic imaging. *Magn. Reson. Imaging* 11, 273–278.
- Larkindale, J., Knight, M.R., 2002. Protection against heat stress-induced oxidative damage in arabidopsis involves calcium, abscisic acid, ethylene, and salicylic acid. *Plant Physiol.* 128, 682–695. <https://doi.org/10.1104/pp.010320.682>
- Larsen, E., Christensen, L.P., 2005. Simple saponification method for the quantitative determination of carotenoids in green vegetables. *J. Agric. Food Chem.* 53, 6598–6602. <https://doi.org/10.1021/jf050622+>
- Larsen, F.J., Schiffer, T.A., Borniquel, S., Sahlin, K., Ekblom, B., Lundberg, J.O., Weitzberg, E., 2011. Dietary inorganic nitrate improves mitochondrial efficiency in humans. *Cell Metab.* 13, 149–159. <https://doi.org/10.1016/j.cmet.2011.01.004>
- Larsen, F.J., Schiffer, T.A., Ekblom, B., Mattsson, M.P., Checa, A., Wheelock, C.E., Nystrom, T., Lundberg, J.O., Weitzberg, E., 2014. Dietary nitrate reduces resting metabolic rate: A randomized, crossover study in humans. *Am. J. Clin. Nutr.* 99, 843–850. <https://doi.org/10.3945/ajcn.113.079491.1>
- Larsen, F.J., Weitzberg, E., Lundberg, J.O., Ekblom, B., 2010. Dietary nitrate reduces maximal oxygen consumption while maintaining work performance in maximal exercise. *Free Radic. Biol. Med.* 48, 342–347. <https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2009.11.006>
- Larsson, S.C., Orsini, N., Wolk, A., 2012. Dietary magnesium intake and risk of stroke: a meta-analysis of prospective studies. *Am. J. Clin. Nutr.* 95, 362–366. <https://doi.org/10.1111/dme.12537>
- Larsson, S.C., Wolk, A., 2007. Magnesium intake and risk of type 2 diabetes: A meta-analysis. *J. Intern. Med.* 262, 208–214. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2796.2007.01840.x>
- Lau, F.C., Shukitt-Hale, B., Joseph, J.A., 2005. The beneficial effects of fruit polyphenols on brain aging. *Neurobiol. Aging* 26S, 128–132. <https://doi.org/10.1016/j.neurobiolaging.2005.08.007>
- Lau, O.S., Deng, X.W., 2012. The photomorphogenic repressors COP1 and DET1: 20 years later. *Trends Plant Sci.* 17, 584–593. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2012.05.004>
- Lau, O.S., Deng, X.W., 2008. Effect of Arabidopsis COP10 ubiquitin E2 enhancement activity across E2 families and functional conservation among its canonical homologues. *Biochem. J.* 418, 683–690. <https://doi.org/10.1042/bj20081943>
- Lau, O.S., Huang, X., Charron, J.B., Lee, J.H., Li, G., Deng, X.W., 2011. Interaction of Arabidopsis DET1 with CCA1 and LHY in mediating transcriptional repression in the plant circadian clock. *Mol. Cell* 43, 703–712. <https://doi.org/10.1016/j.molcel.2011.07.013>
- Laubinger, S., Fittinghoff, K., Hoecker, U., 2004. The SPA quartet: a family of WD-repeat proteins with a central role in suppression of photomorphogenesis in Arabidopsis. *Plant Cell* 16, 2293–2306. <https://doi.org/10.1105/tpc.104.024216>

- Lauer, A.C., Groth, N., Haag, S.F., Darvin, M.E., Lademann, J., Meinke, M.C., 2013. Dose-dependent vitamin C uptake and radical scavenging activity in human skin measured with in vivo electron paramagnetic resonance spectroscopy. *Skin Pharmacol. Physiol.* 26, 147–154. <https://doi.org/10.1159/000350833>
- Law, M.Y., Charles, S.A., Halliwell, B., 1983. Glutathione and ascorbic acid in spinach (*Spinacia oleracea*) chloroplasts. *Biochem. J.* 210, 899–903.
- Lay, P.T., He, J., Sing, K.L., 2002. Effects of root-zone temperature on the root development and nutrient uptake of *Lactuca sativa* L. “Panama” grown in an aeroponic system in the tropics. *J. Plant Nutr.* 25, 297–314. <https://doi.org/10.1081/PLN-100108837>
- Lazaro, A., Mouriz, A., Piñeiro, M., Jarillo, J.A., 2015. Red Light-Mediated Degradation of CONSTANS by the E3 Ubiquitin Ligase HOS1 Regulates Photoperiodic Flowering in *Arabidopsis*. *Plant Cell* 27, 2437–2454. <https://doi.org/10.1105/tpc.15.00529>
- Le Bot, J., Kirkby, E.A., 1992. Diurnal uptake of nitrate and potassium during the vegetative growth of tomato plants. *J. Plant Nutr.* 15, 247–264.
- Lea, U.S., Leydecker, M.-T., Quillere, I., Meyer, C., Lillo, C., 2006. Posttranslational regulation of nitrate reductase strongly affects the levels of free amino acids and nitrate, whereas transcriptional regulation has only minor influence. *Plant Physiol.* 140, 1085–1094. <https://doi.org/10.1104/pp.105.074633>
- Leahu, A., Damian, C., Oroian, M., Miculescu, V., Ropciuc, S., 2013. Variation in content of antioxidant and free radical scavenging activity of basil (*Ocimum Basilicum*), dill (*Anethum graveolens*) and parsley (*Petroselinum sativum*). *Food Environ. Saf.* 12, 347–353.
- Leanderson, P., Faresjö, Å.O., Tagesson, C., 1997. Green tea polyphenols inhibit oxidant-induced DNA strand breakage in cultured lung cells. *Free Radic. Biol. Med.* 23, 235–242. [https://doi.org/10.1016/S0891-5849\(96\)00590-4](https://doi.org/10.1016/S0891-5849(96)00590-4)
- Ledbetter, M.L.S., Lubin, M., 1977. Control of protein synthesis in human fibroblasts by intracellular potassium. *Exp. Cell Res.* 105, 223–236.
- Lee, Jr., R.L., Meyer, W., Hoeppe, G., 2011. Atmospheric ozone and colors of the Antarctic twilight sky. *Appl. Opt.* 50, F162–F171. <https://doi.org/10.1364/ao.50.00f162>
- Lee, D.W., Downum, K.R., 1991. The spectral distribution of biologically active solar radiation at Miami, Florida, USA. *Int. J. Biometeorol.* 35, 48–54.
- Lee, J., He, K., Stolc, V., Lee, H., Figueroa, P., Gao, Y., Tongprasit, W., Zhao, H., Lee, I., Deng, X.W., 2007. Analysis of transcription factor HY5 genomic binding sites revealed its hierarchical role in light regulation of development. *Plant Cell* 19, 731–749. <https://doi.org/10.1105/tpc.106.047688>
- Lee, J., Koo, N., Min, D.B., 2004. Species, Aging, and Antioxidative Nutraceuticals. *Compr. Rev. Food Sci. and Food Saf.* 3, 21–33.
- Lee, K.A., Zaffke, M.E., Baratte-beebe, K., 2001. Restless legs syndrome and sleep disturbance during pregnancy: the role of folate and iron. *J. Womens. Health Gend. Based. Med.* 10, 335–341.
- Lee, M.J., Son, K.H., Oh, M.M., 2016. Increase in biomass and bioactive compounds in lettuce under various ratios of red to far-red LED light supplemented with blue LED light. *Hortic. Environ. Biotechnol.* 57, 139–147. <https://doi.org/10.1007/s13580-016-0133-6>
- Lee, N., Choi, G., 2017. Phytochrome-interacting factor from *Arabidopsis* to liverwort. *Curr. Opin. Plant Biol.* 35, 54–60.

- Leeuwenburgh, C., Hardy, M.M., Hazen, S.L., Wagner, P., Oh-ishi, S., Steinbrecher, U.P., Heinecke, J.W., 1997. Reactive nitrogen intermediates promote low density lipoprotein oxidation in human atherosclerotic intima. *J. Biol. Chem.* 272, 1433–1436.
- Lefsrud, M.G., Kopsell, D.A., Augé, R.M., Both, A.J., 2006. Biomass production and pigment accumulation in kale grown under increasing photoperiods. *HortScience* 41, 603–606.
- Lefsrud, M.G., Kopsell, D.A., Kopsell, D.E., Curran-Celentano, J., 2005. Air temperature affects biomass and carotenoid pigment accumulation in kale and spinach grown in a controlled environment. *HortScience* 40, 2026–2030. <https://doi.org/10.21273/hortsci.40.7.2026>
- Lego, M., Chatterjee, R., Maying, B., 2017. Vietnamese coriander (*Polygonum odorata* L): a potential underutilized spice herb of northeastern India. *Int. J. Farm Sci.* 7, 25–28.
- Legrís, M., Klose, C., Burgie, E.S., Rojas, C.C.R., Neme, M., Hiltbrunner, A., Wigge, P.A., Schäfer, E., Vierstra, R.D., Casal, J.J., 2016. Phytochrome B integrates light and temperature signals in *Arabidopsis*. *Science* (80-.). 354, 897–900. <https://doi.org/10.1126/science.aaf5656>
- Leigh, R.A., 2001. Potassium homeostasis and membrane transport. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 164, 193–198. [https://doi.org/10.1002/1522-2624\(200104\)164:2<193::AID-JPLN193>3.0.CO;2-7](https://doi.org/10.1002/1522-2624(200104)164:2<193::AID-JPLN193>3.0.CO;2-7)
- Leigh, R.A., Johnston, A.E., 1983a. The effects of fertilizers and drought on the concentrations of potassium in the dry matter and tissue water of field-grown spring barley. *J. Agric. Sci.* 101, 741–748.
- Leigh, R.A., Johnston, A.E., 1983b. Concentrations of potassium in the dry matter and tissue water of field-grown spring barley and their relationships to grain yield. *J. Agric. Sci.* 101, 675–685.
- Leivar, P., Quail, P.H., 2011. PIFs: pivotal components in a cellular signaling hub Phytochrome signal perception and transduction. *Trends Plant Sci.* 16, 19–28. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2010.08.003>
- Lekakis, J., Rallidis, L.S., Andreadou, I., Vamvakou, G., Kazantzoglou, G., Magiatis, P., Skaltsounis, A.L., Kremastinos, D.T., 2005. Polyphenolic compounds from red grapes acutely improve endothelial function in patients with coronary heart disease. *Eur. J. Cardiovasc. Prev. Rehabil.* 12, 596–600. <https://doi.org/10.1097/00149831-200512000-00013>
- Lemeille, S., Rochaix, J.D., 2010. State transitions at the crossroad of thylakoid signalling pathways. *Photosynth. Res.* 106, 33–46. <https://doi.org/10.1007/s11120-010-9538-8>
- Lenaz, G., 2001. The mitochondrial production of reactive oxygen species: mechanisms and implications in human pathology. *IUBMB Life (International Union Biochem. Mol. Biol. Life)* 52, 159–164. <https://doi.org/10.1080/15216540152845957>
- Lester, G.E., Jifon, J.L., Rogers, G., 2005. Supplemental foliar potassium applications during muskmelon fruit development can improve fruit quality, ascorbic acid, and beta-carotene contents. *J. Am. Hortic. Sci.* 130, 649–653.
- Levin, I., Frankel, P., Gilboa, N., Tanny, S., Lalazar, A., 2003. The tomato dark green mutation is a novel allele of the tomato homolog of the DEETIOLATED1 gene. *Theor. Appl. Genet.* 106, 454–460. <https://doi.org/10.1007/s00122-002-1080-4>
- Levine, M., Conry-Cantilenat, C., Wang, Y., Welch, R.W., Washko, P.W., Dhariwal, K.R., Park, J.B., Lazarev, A., Graumlich, J.F., Kings, J., Cantilena, L.R., 1996. Vitamin C pharmacokinetics in healthy volunteers: Evidence for a recommended dietary allowance. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 93, 3704–3709.
- Levine, M., Wang, Y., Padayatty, S.J., Morrow, J., 2002. A new recommended dietary allowance of vitamin C for healthy young women. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 98, 9842–9846.

<https://doi.org/10.1073/pnas.171318198>

- Levites, Y., Weinreb, O., Maor, G., Youdim, M.B.H., Mandel, S., 2001. Green tea polyphenol (-)-epigallocatechin-3-gallate prevents N-methyl-4-phenyl- 1,2,3,6-tetrahydropyridine-induced dopaminergic neurodegeneration. *J. Neurochem.* 78, 1073–1082. <https://doi.org/10.1046/j.1471-4159.2001.00490.x>
- Levitt, L.S., 1954. The Role of Magnesium in Photosynthesis. *Science* (80-.). 120, 33–35. <https://doi.org/10.1126/science.120.3105.33>
- Leyva, A., Jarillo, J.A., Salinas, J., Martinez-Zapater, J.M., 1995a. Low temperature induces the accumulation of phenylalanine ammonia-lyase and chalcone synthase mRNAs of *Arabidopsis thaliana* in a light-dependent manner. *Plant Physiol.* 108, 39–46. <https://doi.org/10.1104/pp.108.1.39>
- Leyva, A., Jarillo, J.A., Salinas, J., Martinez-Zapater, J.M., 1995b. Low temperature induces the accumulation of phenylalanine ammonia-lyase and chalcone synthase mRNAs of *Arabidopsis thaliana* in a light-dependent manner. *Plant Physiol.* 108, 39–46. <https://doi.org/10.1104/pp.108.1.39>
- Li, B., Ahmed, F., Bernstein, P.S., 2010. Studies on the singlet oxygen scavenging mechanism of human macular pigment. *Arch. Biochem. Biophys.* 504, 56–60. <https://doi.org/10.1038/mp.2011.182.doi>
- Li, F., Vallabhaneni, R., Yu, J., Rocheford, T., Wurtzel, E.T., 2008. The maize phytoene synthase gene family: overlapping roles for carotenogenesis in endosperm, photomorphogenesis, and thermal stress tolerance. *Plant Physiol.* 147, 1334–1346. <https://doi.org/10.1104/pp.108.122119>
- Li, H., Radunz, A., He, P., Schmid, G.H., 2002. Influence of different light intensities on the content of diosgenin, lipids, carotenoids and fatty acids in leaves of *Dioscorea zingiberensis*. *Zeitschrift fur Naturforsch. - Sect. C J. Biosci.* 57, 135–143. <https://doi.org/10.1515/znc-2002-1-223>
- Li, H., Tang, C., Xu, Z., Liu, X., Han, X., 2012a. Effects of different light sources on the growth of non-heading chinese cabbage (*Brassica campestris* L.). *J. Agric. Sci.* 4, 262–273. <https://doi.org/10.5539/jas.v4n4p262>
- Li, J., Li, G., Wang, H., Wang Deng, X., 2011a. Phytochrome Signaling Mechanisms. *Arab. B.* 9, 1–26. <https://doi.org/10.1199/tab.0148>
- Li, J., Ou-Lee, T.M., Raba, R., Amundson, R.G., Last, R.L., 1993. *Arabidopsis* Flavonoid Mutants Are Hypersensitive to UV-B Irradiation. *Plant Cell* 5, 171–179. <https://doi.org/10.1105/tpc.5.2.171>
- Li, K., Kaaks, R., Linseisen, J., Rohrmann, S., 2011b. Dietary calcium and magnesium intake in relation to cancer incidence and mortality in a German prospective cohort (EPIC-Heidelberg). *Cancer Causes Control* 22, 1375–1382. <https://doi.org/10.1007/s10552-011-9810-z>
- Li, L., Ljung, K., Breton, G., Schmitz, R.J., Pruneda-Paz, J., Cowing-Zitron, C., Cole, B.J., Ivans, L.J., Pedmale, U. V., Jung, H.S., Ecker, J.R., Kay, S.A., Chory, J., 2012b. Linking photoreceptor excitation to changes in plant architecture. *Genes Dev.* 26, 785–790. <https://doi.org/10.1101/gad.187849.112>
- Li, L., Steffens, J.C., 2002. Overexpression of polyphenol oxidase in transgenic tomato plants results in enhanced bacterial disease resistance. *Planta* 215, 239–247. <https://doi.org/10.1007/s00425-002-0750-4>

- Li, L., Yi, H., 2012. Effect of sulfur dioxide on ROS production, gene expression and antioxidant enzyme activity in *Arabidopsis* plants. *Plant Physiol. Biochem.* 58, 46–53.
- Li, N., Hao, M., Phalen, R.F., Hinds, W.C., Nel, A.E., 2003. Particulate air pollutants and asthma: A paradigm for the role of oxidative stress in PM-induced adverse health effects. *Clin. Immunol.* 109, 250–265. <https://doi.org/10.1016/j.clim.2003.08.006>
- Li, Q., Kubota, C., 2009. Effects of supplemental light quality on growth and phytochemicals of baby leaf lettuce. *Environ. Exp. Bot.* 67, 59–64. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2009.06.011>
- Li, T., Heuvelink, E., Dueck, T.A., Janse, J., Gort, G., Marcelis, L.F.M., 2014. Enhancement of crop photosynthesis by diffuse light: Quantifying the contributing factors. *Ann. Bot.* 114, 145–156. <https://doi.org/10.1093/aob/mcu071>
- Li, Y.-Y., Mao, K., Zhao, C., Zhao, X.-Y., Zhang, H.-L., Shu, H.-R., Hao, Y.-J., 2012c. MdCOP1 ubiquitin E3 ligases interact with MdMYB1 to regulate light-induced Anthocyanin biosynthesis and red fruit coloration in apple. *Plant Physiol.* 160, 1011–1022. <https://doi.org/10.1104/pp.112.199703>
- Li, Z., Li, B., Song, X., Zhang, D., 2017. Dietary zinc and iron intake and risk of depression: A meta-analysis. *Psychiatry Res.* 251, 41–47. <https://doi.org/10.1016/j.psychres.2017.02.006>
- Li, Z., Zhang, L., Yu, Y., Quan, R., Zhang, Z., Zhang, H., Huang, R., 2011c. The ethylene response factor AtERF11 that is transcriptionally modulated by the bZIP transcription factor HY5 is a crucial repressor for ethylene biosynthesis in *Arabidopsis*. *Plant J.* 68, 88–99. <https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2011.04670.x>
- Lian, H.L., He, S.B., Zhang, Y.C., Zhu, D.M., Zhang, J.Y., Jia, K.P., Sun, S.X., Li, L., Yang, H.Q., 2011. Blue-light-dependent interaction of cryptochrome 1 with SPA1 defines a dynamic signaling mechanism. *Genes Dev.* 25, 1023–1028. <https://doi.org/10.1101/gad.202511>
- Liang, W., Wang, M., Ai, X., 2009. The role of calcium in regulating photosynthesis and related physiological indexes of cucumber seedlings under low light intensity and suboptimal temperature stress. *Sci. Hortic. (Amsterdam)*. 123, 34–38. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2009.07.015>
- Liang, X., Dron, M., Cramer, C.L., Dixon, R.A., Lamb, C.J., 1989. Differential regulation of phenylalanine ammonia-lyase genes during plant development and by environmental cues. *J. Biol. Chem.* 264, 14486–14492.
- Lichtenthaler, H.K., 1987. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods Enzymol.* 148, 350–382. [https://doi.org/10.1016/0076-6879\(87\)48036-1](https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1)
- Lichtenthaler, H.K., Ač, A., Marek, M. V., Kalina, J., Urban, O., 2007. Differences in pigment composition, photosynthetic rates and chlorophyll fluorescence images of sun and shade leaves of four tree species. *Plant Physiol. Biochem.* 45, 577–588. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2007.04.006>
- Lichtenthaler, H.K., Buschmann, C., 2001. Chlorophylls and carotenoids: measurement and characterization by UV-VIS spectroscopy. *Curr. Protoc. Food Anal. Chem.* F4.3.1-F4. <https://doi.org/10.1002/0471709085.ch21>
- Lichtenthaler, H.K., Buschmann, C., Döll, M., Fietz, H.J., Bach, T., Kozel, U., Meier, D., Rahmsdorf, U., 1981. Photosynthetic activity, chloroplast ultrastructure, and leaf characteristics of high-light and low-light plants and of sun and shade leaves. *Photosynth. Res.* 2, 115–141. <https://doi.org/10.1007/BF00028752>
- Likhanov, A.F., 2014. Identification of intervarietal affinity of raspberry (*Rubus idaeus* L.)

- plants on biochemical profiles of phenolic compounds. Reports NULES Ukr. 49, 1–12.
- Lillo, C., 1994. Light regulation of nitrate reductase in green leaves of higher plants. *Physiol. Plant.* 90, 616–620.
- Lillo, C., 1984. Circadian rhythmicity of nitrate reductase activity in barley leaves. *Physiol. Plant.* 61, 219–223.
- Lim, B., Smirnov, N., Cobbett, C.S., Golz, J.F., 2016. Ascorbate-Deficient *vtc2* mutants in *Arabidopsis* do not exhibit decreased growth. *Front. Plant Sci.* 7, 1–9. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01025>
- Lin, C., Ahmad, M., Gordon, D., Cashmore, A.R., Phinney, B. O, 1995. Expression of an *Arabidopsis* cryptochrome gene in transgenic tobacco results in hypersensitivity to blue, UV-A, and green light. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 92, 8423–8427.
- Lin, C., Shalitin, D., 2003. Cryptochrome structure and signal transduction. *Annu. Rev. Plant Biol.* 54, 469–496. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.54.110901.160901>
- Lin, J.K., Liang, Y.C., Lin-Shiau, S.Y., 1999. Cancer chemoprevention by tea polyphenols through mitotic signal transduction blockade. *Biochem. Pharmacol.* 58, 911–915. [https://doi.org/10.1016/S0006-2952\(99\)00112-4](https://doi.org/10.1016/S0006-2952(99)00112-4)
- Lin, K.H., Huang, M.Y., Huang, W.D., Hsu, M.H., Yang, Z.W., Yang, C.M., 2013. The effects of red, blue, and white light-emitting diodes on the growth, development, and edible quality of hydroponically grown lettuce (*Lactuca sativa* L. var. *capitata*). *Sci. Hortic. (Amsterdam)*. 150, 86–91. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2012.10.002>
- Lin, L.Z., Harnly, J., Zhang, R.W., Fan, X.E., Chen, H.J., 2012. Quantitation of the hydroxycinnamic acid derivatives and the glycosides of flavonols and flavones by UV absorbance after identification by LC-MS. *J. Agric. Food Chem.* 60, 544–553. <https://doi.org/10.1021/jf204612t>
- Lin, Y.S., Wu, S.S., Lin, J.K., 2003. Determination of tea polyphenols and caffeine in tea flowers (*Camellia sinensis*) and their hydroxyl radical scavenging and nitric oxide suppressing effects. *J. Agric. Food Chem.* 51, 975–980. <https://doi.org/10.1021/jf020870v>
- Lindinger, M.I., 1995. Potassium regulation during exercise and recovery in humans: Implications for skeletal and cardiac muscle. *J. Mol. Cell. Cardiol.* 27, 1011–1022. [https://doi.org/10.1016/0022-2828\(95\)90070-5](https://doi.org/10.1016/0022-2828(95)90070-5)
- Linetsky, M., Ortwerth, B.J., 1997. Quantitation of the singlet oxygen produced by UVA irradiation of human lens proteins. *Photochem. Photobiol.* 65, 522–529. <https://doi.org/10.1111/j.1751-1097.1997.tb08598.x>
- Linkohr, B.I., Williamson, L.C., Fitter, A.H., Leyser, H.M.O., 2002. Nitrate and phosphate availability and distribution have different effects on root system architecture of *Arabidopsis*. *Plant J.* 29, 751–760. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3113X.2002.01251.x>
- Lipkin, M., Newmark, H., 1985. Effect of added dietary calcium on colonic epithelial-cell proliferation in subjects at high risk for familial colonic cancer. *N. Engl. J. Med.* 313, 1381–1384.
- Liscum, E., Briggs, W.R., 1995. Mutations in the NPH1 locus of *Arabidopsis* disrupt the perception of phototropic stimuli. *Plant Cell* 7, 473–485. <https://doi.org/10.1105/tpc.7.4.473>
- Liscum, E., Hodgson, D.W., Campbell, T.J., 2003. Blue light signaling through the cryptochromes and phototropins. So that's what the blues is all about. *Plant Physiol.* 133, 1429–1436. <https://doi.org/10.1104/pp.103.030601.far-red>
- Liu, B., Hannun, Y.A., 1997. Inhibition of the neutral magnesium-dependent sphingomyelinase

- by glutathione. *J. Biol. Chem.* 272, 16281–16287. <https://doi.org/10.1074/jbc.272.26.16281>
- Liu, B., Zuo, Z., Liu, H., Liu, X., Lin, C., 2011. Arabidopsis cryptochrome 1 interacts with SPA1 to suppress COP1 activity in response to blue light. *Genes Dev.* 25, 1029–1034. <https://doi.org/10.1101/gad.2025011>
- Liu, H., Fu, Y., Wang, M., Liu, H., 2017. Green light enhances growth, photosynthetic pigments and CO₂ assimilation efficiency of lettuce as revealed by ‘knock out’ of the 480–560 nm spectral waveband. *Photosynthetica* 55, 144–152. <https://doi.org/10.1007/s11099-016-0233-7>
- Liu, X.-Z., Kang, S.-Z., Yi, H.-P., Zhang, J.-H., 2003. Dry-matter partitioning, yield and leaf nutrient contents of tomato plants as influenced by shading at different growth stages. *Pedosphere* 13, 263–270.
- Liu, X., Guo, S., Chang, T., Xu, Z., Takafumi, T., 2012. Regulation of the growth and photosynthesis of cherry tomato seedlings by different light irradiations of light emitting diodes (LED). *African J. Biotechnol.* 11, 6169–6177. <https://doi.org/10.5897/ajb11.1191>
- Liu, X.L., Covington, M.F., Fankhauser, C., Chory, J., Wagner, D.R., 2007. ELF3 Encodes a Circadian Clock-Regulated Nuclear Protein That Functions in an Arabidopsis PHYB Signal Transduction Pathway. *Plant Cell* 13, 1293. <https://doi.org/10.2307/3871296>
- Liu, Y., Roof, S., Ye, Z., Barry, C., van Tuinen, A., Vrebalov, J., Bowler, C., Giovannoni, J., 2004. Manipulation of light signal transduction as a means of modifying fruit nutritional quality in tomato. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 101, 9897–9902. <https://doi.org/10.1073/pnas.0400935101>
- Liu, Z., Zhang, Y., Wang, J., Li, P., Zhao, C., Chen, Y., Bi, Y., 2015. Phytochrome-interacting factors PIF4 and PIF5 negatively regulate anthocyanin biosynthesis under red light in Arabidopsis seedlings. *Plant Sci.* 238, 64–72. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2015.06.001>
- Loa, J., Chow, P., Zhang, K., 2009. Studies of structure-activity relationship on plant polyphenol-induced suppression of human liver cancer cells. *Cancer Chemother. Pharmacol.* 63, 1007–1016. <https://doi.org/10.1007/s00280-008-0802-y>
- Lockhart, J.A., 1956. Reversal of the light inhibition of pea stem growth by the gibberellins. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 42, 841–848. <https://doi.org/10.1073/pnas.42.11.841>
- Logan, B.A., Barker, D.H., Demmig-Adams, B., Adams, W.W., 1996. Acclimation of leaf carotenoid composition and ascorbate levels to gradients in the light environment within an Australian rainforest. *Plant, Cell Environ.* 19, 1083–1090. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1996.tb00215.x>
- Loivamaki, M., Louis, S., Cinege, G., Zimmer, I., Fischbach, R.J., Schnitzler, J.-P., 2006. Circadian rhythms of isoprene biosynthesis in grey poplar leaves. *Plant Physiol.* 143, 540–551. <https://doi.org/10.1104/pp.106.092759>
- Loke, W.M., Proudfoot, J.M., Hodgson, J.M., McKinley, A.J., Hime, N., Magat, M., Stocker, R., Croft, K.D., 2010. Specific dietary polyphenols attenuate atherosclerosis in apolipoprotein e-knockout mice by alleviating inflammation and endothelial dysfunction. *Arterioscler. Thromb. Vasc. Biol.* 30, 749–757. <https://doi.org/10.1161/ATVBAHA.109.199687>
- Loke, W.M., Proudfoot, J.M., Stewart, S., McKinley, A.J., Needs, P.W., Kroon, P.A., Hodgson, J.M., Croft, K.D., 2008. Metabolic transformation has a profound effect on anti-inflammatory activity of flavonoids such as quercetin: Lack of association between antioxidant and lipoxygenase inhibitory activity. *Biochem. Pharmacol.* 75, 1045–1053. <https://doi.org/10.1016/j.bcp.2007.11.002>
- Long, J.C., Jenkins, G.I., 2007. Involvement of plasma membrane redox activity and calcium

- homeostasis in the UV-B and UV-A/blue light induction of gene expression in *Arabidopsis*. *Plant Cell* 10, 2077–2086. <https://doi.org/10.2307/3870785>
- Lopes, G.K.B., Schulmann, H.M., Hermes-Lima, M., 1999. Polyphenol tannic acid inhibits hydroxyl radical formation from Fenton reaction by complexing ferrous ions. *Biochim. Biophys. Acta* 1472, 142–152.
- Lopez-Raez, J., Kohlen, W., Charnikhova, T., Mulder, P., Undas, A.K., Sergeant, M.J., Verstappen, R., Bugg, T.D.H., Thompson, A.J., Ruyter-Spira, C., Bouwmeester, H., 2010. Does abscisic acid affect strigolactone biosynthesis? *New Phytol.* 187, 343–354.
- López-Ráez, J.A., Bouwmeester, H., 2008. Fine-tuning regulation of strigolactone biosynthesis under phosphate starvation. *Plant Signal. Behav.* 3, 963–965. <https://doi.org/10.4161/psb.6126>
- Lopez-Ridaura, R., Willett, W.C., Rimm, E.B., Liu, S., Stampfer, M.J., Manson, J.E., Hu, F.B., 2004. Magnesium intake and risk of type 2 diabetes in men and women. *Diabetes Care* 27, 134–140. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2796.2007.01840.x>
- Lorenz, H.P., Wiebe, H.J., 1980. Effect of temperature on photosynthesis of lettuce adapted to different light and temperature conditions. *Sci. Hortic. (Amsterdam)*. 13, 115–123.
- Loudet, O., Chaillou, S., Krapp, A., Daniel-Vedele, F., 2003. Quantitative trait loci analysis of water and anion contents in interaction with nitrogen availability in *Arabidopsis thaliana*. *Genetics* 163, 711–722.
- Lu, I.F., Sung, M.S., Lee, T.M., 2006. Salinity stress and hydrogen peroxide regulation of antioxidant defense system in *Ulva fasciata*. *Mar. Biol.* 150, 1–15. <https://doi.org/10.1007/s00227-006-0323-3>
- Lu, N., Maruo, T., Johkan, M., Hohjo, M., Tsukagoshi, S., Ito, Y., Ichimura, T., Shinohara, Y., 2012. Effects of supplemental lighting with LEDs on tomato yield and quality of single-truss tomato plants grown at high planting density. *Environ. Control Biol.* 50, 63–74.
- Ludlow, M.M., Wilson, G.L., 1971. Photosynthesis of tropical pasture plants. *Aust. J. Biol. Sci.* 24, 1065–1075.
- Luisa Bonet, M., Canas, J.A., Ribot, J., Palou, A., 2015. Carotenoids and their conversion products in the control of adipocyte function, adiposity and obesity. *Arch. Biochem. Biophys.* 572, 112–125. <https://doi.org/10.1016/j.abb.2015.02.022>
- Lund, J.B., Blom, T.J., Aaslyng, J.M., 2007. End-of-day lighting with different red/far-red ratios using light-emitting diodes affects plant growth of *Chrysanthemum x morifolium* Ramat. “Coral Charm.” *HortScience* 42, 1609–1611.
- Lykkesfeldt, J., Poulsen, H.E., 2010. Is vitamin C supplementation beneficial? Lessons learned from randomised controlled trials. *Br. J. Nutr.* 103, 1251–1259. <https://doi.org/10.1017/S0007114509993229>
- Lynch, J., Lauchli, A., 1998. Salinity affects intracellular calcium in corn root protoplasts. *Plant Physiol.* 87, 351–356. <https://doi.org/10.1104/pp.87.2.351>
- Ma, D., Li, X., Guo, Y., Chu, J., Fang, S., Yan, C., Noel, J.P., Liu, H., 2016. Cryptochrome 1 interacts with PIF4 to regulate high temperature-mediated hypocotyl elongation in response to blue light. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 113, 224–229. <https://doi.org/10.1073/pnas.1511437113>
- Maathuis, F.J., 2009. Physiological functions of mineral macronutrients. *Curr. Opin. Plant Biol.* 12, 250–258. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2009.04.003>
- Macfadyen, A.J., Reiter, C., Zhuang, Y., Beckman, J.S., 1999. A novel superoxide dismutase-based trap for peroxynitrite used to detect entry of peroxynitrite into erythrocyte ghosts. *Chem.*

- Res. Toxicol. 12, 223–229. <https://doi.org/10.1021/tx980253u>
- Mackay, A.D., Barber, S.A., 1984. Soil temperature effects on root growth and phosphorus uptake by corn. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48, 818–823.
- Madhavan Nair, K., Vasuprada Iyengar, V., 2009. Iron content, bioavailability & factors affecting iron status of indians. *Indian J. Med. Res.* 130, 634–645.
- Magalhães, L.M., Segundo, M.A., Reis, S., Lima, J.L.F.C., Tóth, I. V., Rangel, A.O.S.S., 2007. Automatic flow system for sequential determination of ABTS*+ scavenging capacity and Folin-Ciocalteu index: A comparative study in food products. *Anal. Chim. Acta* 592, 193–201. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2007.04.028>
- Mahalko, J.R., Sandstead, H.H., Johnson, L.K., Milne, D.B., 1983. Effect of a moderate increase in dietary protein on the retention and excretion of Ca, Cu, Fe, Mg, P, and Zn by adult males. *Am. J. Clin. Nutr.* 37, 8–14.
- Mahler, H., Wuennenberg, P., Linder, M., Przybyla, D., Zoerb, C., Landgraf, F., Forreiter, C., 2007. Singlet oxygen affects the activity of the thylakoid ATP synthase and has a strong impact on its gamma subunit. *Planta* 225, 1073–1083. <https://doi.org/10.1007/s00425-006-0416-8>
- Mai, T.T., Thu, N.N., Tien, P.G., Chuyen, N. Van, 2007. Alpha-glucosidase inhibitory and antioxidant activities of Vietnamese edible plants and their relationships with polyphenol contents. *J. Nutr. Sci. Vitaminol. (Tokyo)*. 53, 267–276.
- Maier, A., Schrader, A., Kokkelink, L., Falke, C., Welter, B., Iniesto, E., Rubio, V., Uhrig, J.F., Hülskamp, M., Hoecker, U., 2013. Light and the E3 ubiquitin ligase COP1/SPA control the protein stability of the MYB transcription factors PAP1 and PAP2 involved in anthocyanin accumulation in *Arabidopsis*. *Plant J.* 74, 638–651. <https://doi.org/10.1111/tpj.12153>
- Mallappa, C., Yadav, V., Negi, P., Chattopadhyay, S., 2006. A basic leucine zipper transcription factor, G-box-binding factor 1, regulates blue light-mediated photomorphogenic growth in *Arabidopsis*. *J. Biol. Chem.* 281, 22190–22199. <https://doi.org/10.1074/jbc.M601172200>
- Manach, C., Morand, C., Crespy, V., Demigné, C., Texier, O., Régéat, F., Rémésy, C., 1998. Quercetin is recovered in human plasma as conjugated derivatives which retain antioxidant properties. *FEBS Lett.* 426, 331–336. [https://doi.org/10.1016/S0014-5793\(98\)00367-6](https://doi.org/10.1016/S0014-5793(98)00367-6)
- Mancinelli, A.L., Rossi, F., Moroni, A., 1991. Cryptochrome, phytochrome, and anthocyanin production. *Plant Physiol.* 96, 1079–1085. <https://doi.org/10.1104/pp.96.4.1079>
- Manivannan, A., Soundararajan, P., Halimah, N., Ko, C.H., Jeong, B.R., 2015. Blue LED light enhances growth, phytochemical contents, and antioxidant enzyme activities of *Rehmannia glutinosa* cultured in vitro. *Hortic. Environ. Biotechnol.* 56, 105–113. <https://doi.org/10.1007/s13580-015-0114-1>
- Mannen, K., Matsumoto, T., Takahashi, S., Yamaguchi, Y., Tsukagoshi, M., Sano, R., Suzuki, H., Sakurai, N., Shibata, D., Koyama, T., Nakayama, T., 2014. Coordinated transcriptional regulation of isopentenyl diphosphate biosynthetic pathway enzymes in plastids by phytochrome-interacting factor 5. *Biochem. Biophys. Res. Commun.* 443, 768–774. <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2013.12.040>
- Manolescu, D.-C., Sima, A., Bhat, P. V., 2009. All-trans Retinoic Acid Lowers Serum Retinol-Binding Protein 4 Concentrations and Increases Insulin Sensitivity in Diabetic Mice. *J. Nutr.* 140, 311–316. <https://doi.org/10.3945/jn.109.115147>
- Mantelin, S., Touraine, B., 2004. Plant growth-promoting bacteria and nitrate availability: Impacts on root development and nitrate uptake. *J. Exp. Bot.* 55, 27–34.

<https://doi.org/10.1093/jxb/erh010>

- Manzella, J.P., Roberts, N.J., 1979. Human macrophage and lymphocyte responses to mitogen stimulation after exposure to influenza virus, ascorbic acid, and hyperthermia. *J. Immunol.* 123, 1940–1944.
- Manzoor Alam, S., 1999. Nutrient uptake by plants under stress conditions, in: *Handbook of Plant and Crop Stress*. pp. 285–314.
- Mao, J., Zhang, Y.-C., Sang, Y., Li, Q.-H., Yang, H.-Q., 2005. A role for Arabidopsis cryptochromes and COP1 in the regulation of stomatal opening. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 102, 12270–12275. <https://doi.org/10.1073/pnas.0501011102>
- Marcelis, L.F.M., Broekhuijsen, A.G.M., Meinen, E., Nijs, E.M.F.M., Raaphorst, M.G.M., 2006. Quantification of the growth response to light quantity of greenhouse grown crops. *Acta Hortic.* 711, 97–103. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2006.711.9>
- Marcos, A., Nova, E., Montero, A., 2003. Changes in the immune system are conditioned by nutrition. *Eur. J. Clin. Nutr.* 57, S66–S69. <https://doi.org/10.1038/sj.ejcn.1601819>
- Marcotorchino, J., Romier, B., Gouranton, E., Riollet, C., Gleize, B., Malezet-Desmoulins, C., Landrier, J.F., 2012. Lycopene attenuates LPS-induced TNF- α secretion in macrophages and inflammatory markers in adipocytes exposed to macrophage-conditioned media. *Mol. Nutr. Food Res.* 56, 725–732. <https://doi.org/10.1002/mnfr.201100623>
- Mares, J., 2016. Lutein and zeaxanthin isomers in eye health and disease. *Annu. Rev. Nutr.* 36, 571–602. <https://doi.org/10.1146/annurev-nutr-071715-051110>
- Margina, D., Ilie, M., Gradinaru, D., 2012. Quercetin and epigallocatechin gallate induce in vitro a dose-dependent stiffening and hyperpolarizing effect on the cell membrane of human mononuclear blood cells. *Int. J. Mol. Sci.* 13, 4839–4859. <https://doi.org/10.3390/ijms13044839>
- Margis, R., Dunand, C., Teixeira, F.K., Margis-Pinheiro, M., 2008. Glutathione peroxidase family - An evolutionary overview. *FEBS J.* 275, 3959–3970. <https://doi.org/10.1111/j.1742-4658.2008.06542.x>
- Marín, I.C., Loeff, I., Bartetzko, L., Searle, I., Coupland, G., Stitt, M., Osuna, D., 2011. Nitrate regulates floral induction in Arabidopsis, acting independently of light, gibberellin and autonomous pathways. *Planta* 233, 539–552. <https://doi.org/10.1007/s00425-010-1316-5>
- Marles, R.J., 2017. Mineral nutrient composition of vegetables, fruits and grains: The context of reports of apparent historical declines. *J. Food Compos. Anal.* 56, 93–103. <https://doi.org/10.1016/J.JFCA.2016.11.012>
- Marre, M.T., Amicucci, E., Zingarelli, L., Albergoni, F., Marre, E., 1998. The respiratory burst and electrolyte leakage induced by sulfhydryl blockers in *egeria densa* leaves are associated with H₂O₂ production and are dependent on Ca²⁺ influx. *Plant Physiol.* 118, 1379–1387.
- Marschner, H., Cakmak, I., 1989. High light intensity enhances chlorosis and necrosis in leaves of zinc, potassium, and magnesium deficient bean (*Phaseolus vulgaris*) plants. *J. Plant Physiol.* 134, 308–315. [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(89\)80248-2](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(89)80248-2)
- Marshall, D.H., Nordin, B.E.C., Speed, R., 1976. Calcium, phosphorus and magnesium requirement. *Proc. Nutr. Soc.* 35, 163–173.
- Martin, T., Oswald, O., Graham, I.A., 2002. Arabidopsis seedling growth, storage lipid mobilization, and photosynthetic gene expression are regulated by carbon:nitrogen availability. *Plant Physiol.* 128, 472–481. <https://doi.org/10.1104/pp.128.2.472>

- Martínez-García, J.F., Huq, E., Quail, P.H., 2000. Direct targeting of light signals to a promoter element-bound transcription factor. *Science* (80-.). 288, 859–863. <https://doi.org/10.1126/science.288.5467.859>
- Martinoia, E., Heck, U., Wiemken, A., 1981. Vacuoles as storage compartments for nitrate in barley leaves. *Nature* 289, 292–294. <https://doi.org/10.1038/289292a0>
- Mashurabad, P.C., Palika, R., Jyrwa, Y.W., Bhaskarachary, K., Pullakhandam, R., 2017. Dietary fat composition, food matrix and relative polarity modulate the micellarization and intestinal uptake of carotenoids from vegetables and fruits. *J. Food Sci. Technol.* 54, 333–341. <https://doi.org/10.1007/s13197-016-2466-7>
- Massimino, D., Andre, M., Richaud, C., Daguene, A., Massimino, J., Vivoli, J., 1981. The effect of a day at low irradiance of a maize crop. I. Root respiration and uptake of N, P and K. *Physiol. Plant* 51, 150–155.
- Massot, C., Bancel, D., Lauri, F.L., Truffault, V., Baldet, P., Stevens, R., Gautier, H., 2013. High temperature inhibits ascorbate recycling and light stimulation of the ascorbate pool in tomato despite increased expression of biosynthesis genes. *PLoS One* 8, 1–13. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0084474>
- Mastropasqua, L., Borraccino, G., Bianco, L., Paciolla, C., 2012. Light qualities and dose influence ascorbate pool size in detached oat leaves. *Plant Sci.* 183, 57–64. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2011.11.009>
- Matt, P., Geiger, M., Walch-Liu, P., Engels, C., Krapp, A., Stitt, M., 2001. Immediate cause of the diurnal changes of nitrogen metabolism in leaves of nitrate-replete tobacco: a major imbalance between the rate of nitrate reduction. *Plant. Cell Environ.* 24, 177–190.
- Matthews, P.D., Luo, R.B., Wurtzel, E.T., 2003. Maize phytoene desaturase and ζ -carotene desaturase catalyse a poly-Z desaturation pathway: Implications for genetic engineering of carotenoid content among cereal crops. *J. Exp. Bot.* 54, 2215–2230. <https://doi.org/10.1093/jxb/erg235>
- Mattsson, M., Lundborg, T., Larsson, C., 1988. Nitrate utilization in barley: relations to nitrate supply and light/ dark cycles. *Physiol. Plant.* 73, 380–386.
- May, J.M., Qu, Z. chao, Whitesell, R.R., 1995. Ascorbic acid recycling enhances the antioxidant reserve of human erythrocytes. *Biochemistry* 34, 12721–12728. <https://doi.org/10.1021/bi00039a031>
- Mazen, A.M.A., El Maghraby, O.M.O., 1997. Accumulation of cadmium, lead and strontium, and a role of calcium oxalate in water hyacinth tolerance. *Biol. Plant.* <https://doi.org/10.1023/A:1001174132428>
- McAinsh, M.R., Brownlee, C., Hetherington, A.M., 1992. Visualizing changes in cytosolic-free Ca^{2+} during the response of stomatal guard cells to abscisic acid. *Plant Cell* 4, 1113–1122. <https://doi.org/10.2307/3869479>
- McAinsh, M.R., Brownlee, C., Hetherington, A.M., 1990. Abscisic acid-induced elevation of guard cell cytosolic Ca^{2+} precedes stomatal closure. *Nature* 343, 186–188. <https://doi.org/10.1038/343186a0>
- McAinsh, M.R., Clayton, H., Mansfield, T.A., Hetherington, A.M., 1996. Changes in stomatal behavior and guard cell cytosolic free calcium in response to oxidative stress. *Plant Physiol.* 111, 1031–1042. <https://doi.org/10.1104/pp.111.4.1031>
- McAinsh, M.R., Pittman, J.K., 2009. Shaping the calcium signature. *New Phytol.* 181, 275–

294. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02682.x>
- McClanahan Hunt, S., Schofield, F.A., 1969. Magnesium balance and protein intake level in adult human female. *Am. J. Clin. Nutr.* 22, 367–373.
- McClung, C.R., 2011. The photomorphogenic protein, DE-ETIOLATED 1, is a critical transcriptional corepressor in the central loop of the Arabidopsis circadian clock. *Mol. Cell* 43, 693–694. <https://doi.org/10.1016/j.molcel.2011.08.013>
- McClure, B.A., Guilfoyle, T., 1989. Rapid redistribution of auxin-regulated RNAs during gravitropism. *Science* (80-.). 243, 91–93. <https://doi.org/10.1126/science.11540631>
- McCree, K.J., 1972. Test of the current definition of photosynthetically active radiation against leaf photosynthesis data. *Agric. Meteorol.* 10, 443–453.
- McCree, K.J., 1971. The action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants. *Agric. Meteorol.* 9, 191–216.
- McEwen, L.C., Dietz, D.R., 2007. Shade Effects on Chemical Composition of Herbage in the Black Hills. *J. Range Manag.* 18, 184. <https://doi.org/10.2307/3895594>
- McGrath, S.P., 1985. The effects of increasing yields on the macro- and microelement concentrations and offtakes in the grain of winter wheat. *J. Sci. Food Agric.* 36, 1073–1083. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740361108>
- McIntosh, T.K., Vink, R., Yamakami, I., Faden, A.I., 1989. Magnesium protects against neurological deficit after brain injury. *Brain Res.* 482, 252–260. [https://doi.org/10.1016/0006-8993\(89\)91188-8](https://doi.org/10.1016/0006-8993(89)91188-8)
- McIntyre, G.I., 1997. The role of nitrate in the osmotic and nutritional control of plant development. *Aust. J. Plant Physiol.* 24, 103–118.
- McKee, J.A., Brewer, R.P., Macy, G.E., Borel, C.O., Reynolds, J.D., Warner, D.S., 2005. Magnesium neuroprotection is limited in humans with acute brain injury. *Neurocrit. Care* 2, 342–351. <https://doi.org/10.1385/Neurocrit>
- Medina-Remón, A., Casas, R., Tresserra-Rimbau, A., Ros, E., Martínez-González, M.A., Fitó, M., Corella, D., Salas-Salvadó, J., Lamuela-Raventós, R.M., Estruch, R., 2017. Polyphenol intake from a Mediterranean diet decreases inflammatory biomarkers related to atherosclerosis: a substudy of the PREDIMED trial. *Br. J. Clin. Pharmacol.* 83, 114–128. <https://doi.org/10.1111/bcp.12986>
- Mehdy, M., 1994. Active oxygen species in plant defense against pathogens. *Plant Physiol.* 105, 467–472.
- Mehne-Jakobs, B., 1996. Magnesium deficiency treatment causes reductions in photosynthesis of well-nourished Norway spruce. *Trees* 10, 293–300.
- Meier, S., Tzfadia, O., Vallabhaneni, R., Gehring, C., Wurtzel, E.T., 2011. A transcriptional analysis of carotenoid, chlorophyll and plastidial isoprenoid biosynthesis genes during development and osmotic stress responses in Arabidopsis thaliana. *BMC Syst. Biol.* 5. <https://doi.org/10.1186/1752-0509-5-77>
- Meister, A., 1992. On the antioxidant effects of ascorbic acid and glutathione. *Biochem. Pharmacol.* 44, 1905–1915. [https://doi.org/10.1016/0006-2952\(92\)90091-V](https://doi.org/10.1016/0006-2952(92)90091-V)
- Melethil, S., Mason, W.D., Chian-Jo, C., 1986. Dose-dependent absorption and excretion of vitamin C in humans. *Int. J. Pharm.* 31, 83–89. [https://doi.org/10.1016/0378-5173\(86\)90216-4](https://doi.org/10.1016/0378-5173(86)90216-4)

- Melidou, M., Riganakos, K., Galaris, D., 2005. Protection against nuclear DNA damage offered by flavonoids in cells exposed to hydrogen peroxide: The role of iron chelation. *Free Radic. Biol. Med.* 39, 1591–1600. <https://doi.org/10.1016/J.FREERADBIOMED.2005.08.009>
- Melzer, J.M., Kleinhofs, A., Warner, R.L., 1989. Nitrate reductase regulation : Effects of nitrate and light on nitrate reductase mRNA accumulation. *Mol. Gen. Genet.* 217, 341–346.
- Mendez, M., Gwynn-Jones, D., Manetas, Y., 1999. Enhanced UV-B radiation under field conditions increases anthocyanin and reduces the risk of photoinhibition but does not affect growth in the carnivorous plant *Pinguicula vulgaris*. *New Phytol.* 144, 275–282.
- Menéndez, M., Herrera, J., Comín, F.A., 2002. Effect of nitrogen and phosphorus supply on growth, chlorophyll content and tissue composition of the macroalga *Chaetomorpha linum* (O.F. Müll), Kütz, in a Mediterranean Coastal Lagoon. *Sci. Mar.* 66, 355–364. <https://doi.org/10.3989/scimar.2002.66n4355>
- Menniti, F.S., Knoth, J., Diliberto, E.J., 1986. Role of ascorbic acid in dopamine beta-hydroxylation. *J. Biol. Chem.* 261, 16901–16908.
- Mercader, J., Granados, N., Bonet, M.L., Palou, A., 2008. All-trans retinoic acid decreases murine adipose retinol binding protein 4 production. *Cell. Physiol. Biochem.* 22, 363–372. <https://doi.org/10.1159/000149815>
- Mertens-Talcott, S.U., Jilma-Stohlawetz, P., Rios, J., Hingorani, L., Derendorf, H., 2006. Absorption, metabolism, and antioxidant effects of pomegranate (*Punica granatum* L.) polyphenols after ingestion of a standardized extract in healthy human volunteers. *J. Agric. Food Chem.* 54, 8956–8961. <https://doi.org/10.1021/jf061674h>
- Merzlyak, M.N., Chivkunova, O.B., 2000. Light-stress-induced pigment changes and evidence for anthocyanin photoprotection in apples. *J. Photochem. Photobiol. B Biol.* 55, 155–163. [https://doi.org/10.1016/S1011-1344\(00\)00042-7](https://doi.org/10.1016/S1011-1344(00)00042-7)
- Merzlyak, M.N., Gitelson, A.A., 1995. Why and what for the leaves are yellow in autumn? On the interpretation of optical spectra of senescing leaves (*Acer platanoides* L.). *J. Plant Physiol.* 145, 315–320.
- meteoblue, 2018. Weather history download Hanoi [WWW Document]. Hist. +. URL https://www.meteoblue.com/en/weather/archive/export/hanoi_vietnam_1581130 (accessed 8.17.18).
- Mey, J., 2017. Vitamin A im Gehirn: Die Bedeutung der Retinsäure-Signaltransduktion für das adulte Nervensystem. *e-Neuroforum* 12, 152–159. <https://doi.org/10.1515/nf-2006-0103>
- Meyer, J., 1996. Technik im Zierpflanzenbau, in: Horn, W. (Ed.), *Zierpflanzenbau*. Blackwell Wissenschafts-Verlag GmbH, Berlin, Wien, pp. 46–98.
- Miao, L., Zhang, Y., Yang, X., Xiao, J., Zhang, H., Zhang, Z., Wang, Y., Jiang, G., 2016. Colored light-quality selective plastic films affect anthocyanin content, enzyme activities, and the expression of flavonoid genes in strawberry (*Fragaria × ananassa*) fruit. *Food Chem.* 207, 93–100. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.02.077>
- Micozzi, M.S., Brown, E.D., Edwards, B.K., Bieri, J.G., Taylor, P.R., Khachik, F., Beecher, G.R., Smith, J.C., 1992. Plasma carotenoid response to chronic intake of selected foods and beta-carotene supplements in men. *Am. J. Clin. Nutr.* 55, 1120–1125.
- Mielgo-Ayuso, J., Valtueña, J., Huybrechts, I., Breidenassel, C., Cuenca-García, M., De He-nauw, S., Stehle, P., Kafatos, A., Kersting, M., Widhalm, K., Manios, Y., Azzini, E., Molnar, D., Moreno, L.A., González-Gross, M., 2017. Fruit and vegetables consumption is associated with higher vitamin intake and blood vitamin status among European adolescents. *Eur. J. Clin.*

- Nutr. 71, 458–467. <https://doi.org/10.1038/ejcn.2016.232>
- Mika, A., Lüthje, S., 2003. Properties of guaiacol peroxidase activities isolated from corn root plasma membranes. *Plant Physiol.* 132, 1489–1498. <https://doi.org/10.1104/pp.103.020396>. Askerlund
- Millard, P., 1988. The accumulation and storage of nitrogen by herbaceous plants. *Plant, Cell Environ.* 11, 1–8.
- Miller, J.L., 2013. Iron deficiency anemia: a common and curable disease. *Cold Spring Harb. Perspect. Med.* 3, 1–13. <https://doi.org/10.1101/cshperspect.a011866>
- Miller, N.J., Rice-Evans, C.A., 1997. The relative contributions of ascorbic acid and phenolic antioxidants to the total antioxidant activity of orange and apple fruit juices and blackcurrant drink. *Food Chem.* 60, 331–337. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(96\)00339-1](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(96)00339-1)
- Miller, N.J., Sampson, J., Candeias, L.P., Bramley, P.M., Rice-Evans, C.A., 1996. Antioxidant activities of carotenes and xanthophylls. *FEBS Lett.* 384, 240–242.
- Millet, B., Pickard, B.G., 1988. Early wrong-way response occurs in orthogravitropism of maize roots treated with lithium. *Physiol. Plant.* 72, 555–559.
- Minorsky, P. V., Spanswick, R.M., 1989. Electrophysiological evidence for a role for calcium in temperature sensing by roots of cucumber seedlings. *Plant. Cell Environ.* 12, 137–143. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1989.tb01925.x>
- Mira, L., Fernandez, M.T., Santos, M., Rocha, R., Florêncio, M.H., Jennings, K.R., 2002. Interactions of flavonoids with iron and copper ions: a mechanism for their antioxidant activity. *Free Radic. Res.* 36, 1199–208. <https://doi.org/10.1080/1071576021000016463>
- Miyake, C., Asada, K., 1992. Thylakoid-Bound Ascorbate Peroxidase in Spinach Chloroplasts and Photoreduction of Its Primary Oxidation Product Monodehydroascorbate Radicals in Thylakoids. *Plant Cell Physiol.* 33, 541–553. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.pcp.a078288>
- Miyazaki, H., Oh-ishi, S., Ookawara, T., Kizaki, T., Toshinai, K., Ha, S., Haga, S., Ji, L.L., Ohno, H., 2001. Strenuous endurance training in humans reduces oxidative stress following exhausting exercise. *Eur. J. Appl. Physiol.* 84, 1–6. <https://doi.org/10.1007/s004210000342>
- Mizushima, S., Cappuccio, F.P., Nichols, R., Elliott, P., 1998. Dietary magnesium intake and blood pressure: A qualitative overview of the observational studies. *J. Hum. Hypertens.* 12, 447–453. <https://doi.org/10.1038/sj.jhh.1000641>
- Mohammadi, M., Kazemi, H., 2002. Changes in peroxidase and polyphenol oxidase activities in susceptible and resistant wheat heads inoculated with *Fusarium graminearum* and induced resistance. *Plant Sci.* 162, 491–498. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(01\)00538-6](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(01)00538-6)
- Mohr, H., Drumm-Herrel, H., 1983. Coaction between phytochrome and blue/UV light in anthocyanin synthesis in seedlings. *Physiol. Plant.* 58, 408–414. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1983.tb04202.x>
- Møller, I.M., Sweetlove, L.J., 2010. ROS signalling - specificity is required. *Trends Plant Sci.* 15, 370–374. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2010.04.008>
- Moller, S.G., Kim, Y.-S., Kunkel, T., Chua, N.-H., 2003. PP7 is a positive regulator of blue light signaling in *Arabidopsis*. *Plant Cell* 15, 1111–1119. <https://doi.org/10.1105/tpc.008649>
- Mollik, Ariful, H., Hassan, A.I., Paul, T.K., Sintaha, M., Khaleque, H.N., Noor, F.A., Nahar, A., Seraj, S., Jahan, R., Chowdhury, M.H., Rahmatullah, M., 2010. A survey of medicinal

- plants usage by folk medicinal practitioners in two villages by Rupsha river in Bagerhat District, Bangladesh. *Am. J. Sustain. Agric.* 4, 349–356.
- Monroy, A.F., Dhindsa, R.S., 1995. Low-temperature signal transduction: induction of cold acclimation-specific genes of alfalfa by calcium at 25 degrees C. *Plant Cell* 7, 321–331. <https://doi.org/10.2307/3869854>
- Montanaro, G., Dichio, B., Xiloyannis, C., Celano, G., 2006. Light influences transpiration and calcium accumulation in fruit of kiwifruit plants (*Actinidia deliciosa* var. *deliciosa*). *Plant Sci.* 170, 520–527. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2005.10.004>
- Monteith, J.L., 1962. Attenuation of solar radiation: A climatological study. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 88, 508–521. <https://doi.org/10.1002/qj.49708837812>
- Montero, T., Molla, E., Martin-Cabrejas, M.A., Lopez-Andreu, F.J., 1998. Effects of Gibberellic Acid (GA) on Strawberry PAL (Phenylalanine Ammonia-L (Tyrosine Ammonia-Lyase) Enzyme Activities. *J. Sci. Food Agric.* 77, 230–234.
- Mora, J.R., Iwata, M., von Andrian, U.H., 2008. Vitamin effects on the immune system: vitamins A and D take centre stage. *Nat. Rev. Immunol.* 8, 685–698. <https://doi.org/10.1038/nri2378>. Vitamin
- Morel, F., Doussiere, J., Vignais, P. V., 1991. The superoxide-generating oxidase of phagocytic cells: Physiological, molecular and pathological aspects. *Eur. J. Biochem.* 201, 523–546. <https://doi.org/10.1111/j.1432-1033.1991.tb16312.x>
- Morgan, D.C., Smith, H., 1976. Linear relationship between phytochrome photoequilibrium and growth in plants under simulated natural radiation. *Nature* 262, 210–212. <https://doi.org/10.1038/262210a0>
- Mori, M., Yoshida, K., Ishigaki, Y., Matsunaga, T., Nikaido, O., Kameda, K., Kondo, T., 2005. UV-B protective effect of a polyacylated anthocyanin, HBA, in flower petals of the blue morning glory, *Ipomoea tricolor* cv. Heavenly Blue. *Bioorg. Med. Chem.* 13, 2015–2020. <https://doi.org/10.1016/J.BMC.2005.01.011>
- Morrow, R.C., 2008. LED lighting in horticulture. *HortScience* 43, 1947–1950. https://doi.org/10.1007/978-981-10-5807-3_7
- Mortensen, L.M., 1986. Effect of relative humidity on growth and flowering of some greenhouse plants. *Sci. Hortic. (Amsterdam)*. 29, 301–307. [https://doi.org/10.1016/0304-4238\(86\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0304-4238(86)90013-0)
- Mortensen, L.M., Fjeld, T., 1998. Effects of air humidity, lighting period and lamp type on growth and vase life of roses. *Sci. Hortic. (Amsterdam)*. 73, 229–237. [https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(98\)00075-2](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(98)00075-2)
- Mortensen, L.M., Gislerød, H.R., 2000. Effect of air humidity on growth, keeping quality, water relations, and nutrient content of cut roses. *Gartenbauwissenschaft* 65, 40–44.
- Mortensen, L.M., Moe, R., 1992. Effects of selective screening of the daylight spectrum, and of twilight on plant growth in greenhouses. *Acta Hortic.* 103–108. <https://doi.org/10.17660/actahortic.1992.305.14>
- Mortensen, L.M., Strømme, E., 1987. Effects of light quality on some greenhouse crops. *Sci. Hortic. (Amsterdam)*. 33, 27–36. [https://doi.org/10.1016/0304-4238\(87\)90029-X](https://doi.org/10.1016/0304-4238(87)90029-X)
- Mouria, M., Gukovskaya, A.S., Jung, Y., Buechler, P., Hines, O.J., Reber, H.A., Pandol, S.J., 2002. Food-derived polyphenols inhibit pancreatic cancer growth through mitochondrial cytochrome c release and apoptosis. *Int. J. Cancer* 98, 761–769.

<https://doi.org/10.1002/ijc.10202>

- Mu, R.L., Cao, Y.R., Liu, Y.F., Lei, G., Zou, H.F., Liao, Y., Wang, H.W., Zhang, W.K., Ma, B., Du, J.Z., Yuan, M., Zhang, J.S., Chen, S.Y., 2009. An R2R3-type transcription factor gene AtMYB59 regulates root growth and cell cycle progression in Arabidopsis. *Cell Res.* 19, 1291–1304. <https://doi.org/10.1038/cr.2009.83>
- Muller-Moule, P., Conklin, P.L., Niyogi, K.K., 2002. Ascorbate Deficiency Can Limit Violaxanthin De-Epoxidase Activity in Vivo. *Plant Physiol.* 128, 970–977. <https://doi.org/10.1104/pp.010924>
- Müller, C., Robertson, R.D., 2014. Projecting future crop productivity for global economic modeling. *Agric. Econ.* 45, 37–50. <https://doi.org/10.1111/agec.12088>
- Müller Jonassen, E., Lea, U.S., Lillo, C., 2008. HY5 and HYH are positive regulators of nitrate reductase in seedlings and rosette stage plants. *Planta* 227, 559–564. <https://doi.org/10.1007/s00425-007-0638-4>
- Müller Jonassen, E., Sandsmark, B.A.A., Lillo, C., 2009a. Unique status of NIA2 in nitrate assimilation: NIA2 expression is promoted by HY5/HYH and inhibited by PIF4. *Plant Signal. Behav.* 4, 1084–1086. <https://doi.org/10.4161/psb.4.11.9795>
- Müller Jonassen, E., Sevin, D.C., Lillo, C., 2009b. The bZIP transcription factors HY5 and HYH are positive regulators of the main nitrate reductase gene in Arabidopsis leaves, NIA2, but negative regulators of the nitrate uptake gene NRT1.1. *J. Plant Physiol.* 166, 2071–2076.
- Muller, K., Linkies, A., Vreeburg, R.A.M., Fry, S.C., Krieger-Liszka, A., Leubner-Metzger, G., 2009. In vivo cell wall loosening by hydroxyl radicals during cress seed germination and elongation growth. *Plant Physiol.* 150, 1855–1865. <https://doi.org/10.1104/pp.109.139204>
- Müller, T., Haussmann, H.J., Schepers, G., 1997. Evidence for peroxynitrite as an oxidative stress-inducing compound of aqueous cigarette smoke fractions. *Carcinogenesis* 18, 295–301. <https://doi.org/10.1093/carcin/18.2.295>
- Muneer, S., Kim, E.J., Park, J.S., Lee, J.H., 2014. Influence of green, red and blue light emitting diodes on multiprotein complex proteins and photosynthetic activity under different light intensities in lettuce leaves (*Lactuca sativa* L.). *Int. J. Mol. Sci.* 15, 4657–4670. <https://doi.org/10.3390/ijms15034657>
- Munné-Bosch, S., 2005. The role of α -tocopherol in plant stress tolerance. *J. Plant Physiol.* 162, 743–748. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2005.04.022>
- Muñoz, P., Antón, A., Paranjpe, A., Ariño, J.I., Montero, I., 2008. High decrease in nitrate leaching by lower N input without reducing greenhouse tomato yield. *Agron. Sustain. Dev.* 28, 489–495. <https://doi.org/10.1051/agro:2008024>
- Murage, E.N., Sato, Y., Masuda, M., 1996. Relationship between dark period and leaf chlorosis, potassium, magnesium and calcium content of young eggplants. *Sci. Hortic. (Amsterdam)*. 66, 9–16. [https://doi.org/10.1016/0304-4238\(95\)00866-7](https://doi.org/10.1016/0304-4238(95)00866-7)
- Murata, N., 1969. Control of excitation transfer in photosynthesis. II. Magnesium ion-dependent distribution of excitation energy between two pigment systems in spinach chloroplasts. *Biochim. Biophys. Acta* 189, 171–181. [https://doi.org/10.1016/0005-2728\(69\)90045-0](https://doi.org/10.1016/0005-2728(69)90045-0)
- Murata, T., Tamai, H., Morinobu, T., Manago, M., Takenaka, H., Hayashi, K., Mino, M., 1994. Effect of long-term administration of β -carotene on lymphocyte subsets in humans. *Am. J. Clin. Nutr.* 60, 597–602. <https://doi.org/10.1093/ajcn/60.4.597>
- Murray-Kolb, L.E., Beard, J.L., 2007. Iron treatment normalizes cognitive functioning in young women. *Am. J. Clin. Nutr.* 85, 778–787.

- Mustilli, A.C., Fenzi, F., Ciliento, R., Alfano, F., Bowler, C., 1999. Phenotype of the tomato high pigment-2 mutant is caused by a mutation in the tomato homolog of DEETIOLATED1. *Plant Cell* 11, 145–157. <https://doi.org/10.2307/3870847>
- Muto, S., Miyachi, S., Usuda, H., Edwards, G.E., Bassham, J.A., 1981. Light-induced conversion of nicotinamide adenine dinucleotide to nicotinamide adenine dinucleotide phosphate in higher plant leaves. *Plant Physiol.* 68, 324–328. <https://doi.org/10.1104/pp.68.2.324>
- Myers, J., French, C.S., 1960. Evidences from action spectra for a specific participation of chlorophyll b in photosynthesis. *J. Gen. Physiol.* 43, 723–736. <https://doi.org/10.1085/jgp.43.4.723>
- Nadelhoffer, K. J., Aber, J. D., Melillo, J. M. 1984. Seasonal patterns of ammonium and nitrate uptake in nine temperate forest ecosystems. *Plant and Soil* 80, 321–335.
- Nagata, H., Takekoshi, S., Takagi, T., Honma, T., Watanabe, K., 1999. Antioxidative action of flavonoids, quercetin and catechin, mediated by the activation of glutathione peroxidase. *To-kai J. Exp. Clin. Med.* 24, 1–11.
- Nagatani, A., Reed, J.W., Chory, J., 1993. Isolation and initial characterization of *Arabidopsis* mutants that are deficient in phytochrome A. *Plant Physiol.* 102, 269–277. <https://doi.org/10.1104/pp.102.1.269>
- Najiah, M., Nadirah, M., Arief, Z., Zahrol, S., Tee, L.W., Ranzi, A.D., Amar, A.D., Laith, A.A., Mariam, M., Suzana, S., Aida, R.J., 2011. Antibacterial activity of Malaysian edible herbs extracts on fish pathogenic bacteria. *Res. J. Med. Plant* 5, 772–778.
- Nakagawa, K., Kiko, T., Miyazawa, Taiki, Carpentero Burdeos, G., Kimura, F., Satoh, A., Miyazawa, Teruo, 2011. Antioxidant effect of astaxanthin on phospholipid peroxidation in human erythrocytes. *Br. J. Nutr.* 105, 1563–1571. <https://doi.org/10.1017/s0007114510005398>
- Nakamura, Y., 2013. Phosphate starvation and membrane lipid remodeling in seed plants. *Prog. Lipid Res.* 52, 43–50. <https://doi.org/10.1016/J.PLIPRES.2012.07.002>
- Nakashima, Y., Suzue, R., Sanada, H., Kawada, S., 1970. Effect of ascorbic acid on hydroxylase activity. *J. Vitaminol. (Kyoto).* 16, 276–280. <https://doi.org/10.5925/jnsv1954.16.276>
- Nakata, P.A., 2003. Advances in our understanding of calcium oxalate crystal formation and function in plants. *Plant Sci.* 164, 901–909. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(03\)00120-1](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(03)00120-1)
- Nanasombat, S., Teckchuen, N., 2009. Antimicrobial, antioxidant and anticancer activities of Thai local vegetables. *J. Med. Plants Res.* 3, 443–449.
- Nantitanon, W., Yotsawimonwat, S., Okonogi, S., 2010. Factors influencing antioxidant activities and total phenolic content of guava leaf extract. *LWT - Food Sci. Technol.* 43, 1095–1103. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2010.02.015>
- Narasinga Rao, B.S., Vijayasathy, C., Prabhavathi, T., 1983. Iron absorption from habitual diets of Indians studied by the extrinsic tag technique. *Indian J. Med. Res.* 77, 648–657.
- Natella, F., Nardini, M., Di Felice, M., Scaccini, C., 1999. Benzoic and cinnamic acid derivatives as antioxidants: Structure- activity relation. *J. Agric. Food Chem.* 47, 1453–1459. <https://doi.org/10.1021/jf980737w>
- Nautiyal, S., Badola, H.K., Pal, M., Negi, D.S., 1994. Plant responses to water stress: changes in growth, dry matter production, stomatal frequency and leaf anatomy. *Biol. Plant.* 36, 91–97. <https://doi.org/10.1007/BF02921275>
- Nazoa, P., Vidmar, J.J., Tranbarger, T.J., Mouline, K., Damiani, I., Tillard, P., Zhuo, D., Glass,

- A.D.M., Touraine, B., 2003. Regulation of the nitrate transporter gene AtNRT2.1 in *Arabidopsis thaliana*: Responses to nitrate, amino acids and developmental stage. *Plant Mol. Biol.* 52, 689–703. <https://doi.org/10.1023/A:1024899808018>
- Neill, M.E.O., Carroll, Y., Corridan, B., Olmedilla, B., Granado, F., Blanco, I., Berg, H. Van Den, Hininger, I., Rousell, A., Chopra, M., Southon, S., Thurnham, D.I., 2001. A European carotenoid database to assess carotenoid intakes and its use in a five-country comparative study. *Br. J. Nutr.* 85, 499–507. <https://doi.org/10.1079/BJN2000284>
- Nejad, A.R., Van Meeteren, U., 2007. The role of abscisic acid in disturbed stomatal response characteristics of *Tradescantia virginiana* during growth at high relative air humidity. *J. Exp. Bot.* 58, 627–636. <https://doi.org/10.1093/jxb/erl234>
- Nelson, G.C., Valin, H., Sands, R.D., Havlík, P., Ahammad, H., Deryng, D., Elliott, J., Fujimori, S., Hasegawa, T., Heyhoe, E., Kyle, P., Von Lampe, M., Lotze-Campen, H., Mason D’Croz, D., Van Meijl, H., Van Der Mensbrugghe, D., Müller, C., Popp, A., Robertson, R., Robinson, S., Schmid, E., Schmitz, C., Tabeau, A., Willenbockel, D., 2014. Climate change effects on agriculture: Economic responses to biophysical shocks. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 111, 3274–3279. <https://doi.org/10.1073/pnas.1222465110>
- Nelson, M.T., Cheng, H., Rubart, M., Santana, L.F., Bonev, A.D., Knot, H.J., Lederer, W.J., 1995. Relaxation of arterial smooth muscle by calcium sparks. *Science* (80-.). 270, 633–637. <https://doi.org/10.1126/science.270.5236.633>
- Nelson, N., Yocum, C.F., 2006. Structure and function of photosystems I and II. *Annu. Rev. Plant Biol.* 57, 521–565. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.57.032905.105350>
- Nezames, C.D., Deng, X.W., 2012. The COP9 signalosome: its regulation of cullin-based E3 ubiquitin ligases and role in photomorphogenesis. *Plant Physiol.* 160, 38–46. <https://doi.org/10.1104/pp.112.198879>
- Nicole, C.C.S., Mooren, J., Pereira Terra, A.T., Larsen, D.H., Woltering, E.J., Marcelis, L.F.M., Verdonk, J., Schouten, R., Troost, F., 2019. Effects of LED lighting recipes on post-harvest quality of leafy vegetables grown in a vertical farm. *Acta Hortic.* 1256, 481–488. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2019.1256.68>
- Nieman, R.H., Clark, R.A., 1976. Interactive effects of salinity and phosphorus nutrition of the concentrations of phosphate and phosphate esters in mature photosynthesizing corn leaves. *Plant Physiol.* 57, 157–161. <https://doi.org/10.1104/pp.57.2.157>
- Nieto, C., Lopez-Salmeron, V., Daviere, J.-M., Prat, S., 2015. ELF3-PIF4 interaction regulates plant growth independently of the evening complex. *Curr. Biol.* 25, 187–193.
- Niki, E., 2010. Assessment of antioxidant capacity in vitro and in vivo. *Free Radic. Biol. Med.* 49, 503–515. <https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2010.04.016>
- Niki, E., 1987. Interaction of ascorbate and α -tocopherol. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 498, 186–199. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1987.tb23761.x>
- Ninu, L., Ahmad, M., Miarelli, C., Cashmore, A.R., Giuliano, G., 1999. Cryptochrome 1 controls tomato development in response to blue light. *Plant J.* 18, 551–556. <https://doi.org/10.1046/j.1365-313X.1999.00466.x>
- Nishio, J.N., 2000. Why are higher plants green? Evolution of the higher plant photosynthetic pigment complement. *Plant, Cell Environ.* 23, 539–548. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2000.00563.x>
- Niu, S.S., Xu, C.J., Zhang, W.S., Zhang, B., Li, X., Lin-Wang, K., Ferguson, I.B., Allan, A.C., Chen, K.S., 2010. Coordinated regulation of anthocyanin biosynthesis in Chinese bayberry

- (*Myrica rubra*) fruit by a R2R3 MYB transcription factor. *Planta* 231, 887–899. <https://doi.org/10.1007/s00425-009-1095-z>
- Niu, Y., Chai, R., Liu, L., Jin, G., Liu, M., Tang, C., Zhang, Y., 2014. Magnesium availability regulates the development of root hairs in *Arabidopsis thaliana* (L.) Heynh. *Plant Cell Environ.* 37, 2795–2813. <https://doi.org/10.1111/pce.12362>
- Nixdorf, M., Hoecker, U., 2010. SPA1 and DET1 act together to control photomorphogenesis throughout plant development. *Planta* 231, 825–833. <https://doi.org/10.1007/s00425-009-1088-y>
- Noctor, G., De Paepe, R., Foyer, C.H., 2007. Mitochondrial redox biology and homeostasis in plants. *Trends Plant Sci.* 12, 125–134. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2007.01.005>
- Noh, B., Spalding, E.P., 1998. Anion channels and the stimulation of anthocyanin accumulation by blue light in *Arabidopsis* seedlings. *Plant Physiol.* 116, 503–509.
- Nölte, J., 2001. 1.1 Analytische Merkmale der ICP OES, in: *ICP Emissionsspektrometrie Für Praktiker: Grundlagen, Methodenentwicklung, Anwendungsbeispiele*. pp. 1–2.
- Noorazar, S., gholamreza, Ranjbar, F., Nemati, N., Yasamineh, N., Kalejahi, P., 2015. Relationship between severity of depression symptoms and iron deficiency anemia in women with major depressive disorder. *J. Anal. Res. Clin. Med.* 3, 219–224. <https://doi.org/10.15171/jarc.2015.034>
- Nordström, A., Tarkowski, P., Tarkowska, D., Norbaek, R., Åstot, C., Dolezal, K., Sandberg, G., 2004. Auxin regulation of cytokinin biosynthesis in *Arabidopsis thaliana*: A factor of potential importance for auxin-cytokinin-regulated development. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 101, 8039–8044. <https://doi.org/10.1073/pnas.0402504101>
- Norman, S.M., Maier, V.P., Pon, D.L., 1990. Absciscic Acid Accumulation and Carotenoid and Chlorophyll Content in Relation to Water Stress and Leaf Age of Different Types of Citrus. *J. Agric. Food Chem.* 38, 1326–1334. <https://doi.org/10.1021/jf00096a007>
- Noroozi, M., Angerson, W.J., Lean, M.E.J., 1998. Effects of flavonoids and vitamin C on oxidative DNA damage to human lymphocytes. *Am. J. Clin. Nutr.* 67, 1210–1218.
- Norrish, A.E., Jackson, R.T., Sharpe, S.J., Murray Skeaff, C., 2000. Prostate cancer and dietary carotenoids. *Am. J. Epidemiol.* 151, 119–123. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aje.a010176>
- Novák, V., Vidovič, J., 2003. Transpiration and nutrient uptake dynamics in maize (*Zea mays* L.). *Ecol. Modell.* 166, 99–107. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(03\)00102-9](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(03)00102-9)
- Novickovas, A., Brazaityte, A., Duchovskis, P., Jankauskiene, J., Samuoliene, G., Viršile, A., Sirtautas, R., Bliznikas, Z., Žukauskas, A., 2012. Solid-state lamps (LEDs) for the short-wave-length supplementary lighting in greenhouses: Experimental results with cucumber. *Acta Hortic.* 927, 723–730. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.927.90>
- Nusinow, D.A., Helfer, A., Hamilton, elizabeth E., King, J.J., Imaizumi, T., Schultz, T.F., Farre, E.M., Kay, S.A., 2012. The ELF4-ELF3-LUX complex links the circadian clock to diurnal control of hypocotyl growth. *Nature* 475, 398–402. <https://doi.org/10.1038/nature10182>
- Oberleithner, H., Callies, C., Kusche-Vihrog, K., Schillers, H., Shahin, V., Riethmüller, C., MacGregor, G.A., de Wardener, H.E., 2009. Potassium softens vascular endothelium and increases nitric oxide release. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 106, 2829–2834. <https://doi.org/10.1073/pnas.0813069106>

- Ogawa, S., Matsumae, T., Kataoka, T., Yazaki, Y., Yamaguchi, H., 2013. Effect of acacia polyphenol on glucose homeostasis in subjects with impaired glucose tolerance: A randomized multicenter feeding trial. *Exp. Ther. Med.* 5, 1566–1572. <https://doi.org/10.3892/etm.2013.1029>
- Ogawa, T., 1981. Blue light response of stomata with starch-containing (*Vicia faba*) and starch-deficient (*Allium cepa*) guard cells under background illumination with red light. *Plant Sci. Lett.* 22, 103–108.
- Oh, E., Kang, H., Yamaguchi, S., Park, J., Lee, D., Kamiya, Y., Choi, G., 2009. Genome-wide analysis of genes targeted by PHYTOCHROME INTERACTING FACTOR 3-LIKE5 during seed germination in *Arabidopsis*. *Plant Cell* 21, 403–419. <https://doi.org/10.1105/tpc.108.064691>
- Oh, E., Yamaguchi, S., Hu, J., Yusuke, J., Jung, B., Paik, I., Lee, H.-S., Sun, T. -p., Kamiya, Y., Choi, G., 2007. PIL5, a phytochrome-interacting BHLH protein, regulates gibberellin responsiveness by binding directly to the GAI and RGA promoters in *Arabidopsis* seeds. *Plant Cell* 19, 1192–1208. <https://doi.org/10.1105/tpc.107.050153>
- Ohashi-Kaneko, K., Takase, M., Kon, N., Fujiwara, K., Kurata, K., 2011. Effect of light quality on growth and vegetable quality in leaf lettuce, spinach and komatsuna. *Environ. Control Biol.* <https://doi.org/10.2525/ecb.45.189>
- Ohmiya, A., 2009. Carotenoid cleavage dioxygenases and their apocarotenoid products in plants. *Plant Biotechnol.* 26, 351–358. <https://doi.org/10.5511/plantbiotechnology.26.351>
- Ojima, F., Sakamoto, H., Ishiguro, Y., Terao, J., 1993. Consumption of carotenoids in photosensitized oxidation of human plasma and plasma low-density lipoprotein. *Free Radic. Biol. Med.* 15, 377–384.
- Okabe, S., Suganuma, M., Hayashi, M., Sueoka, E., Komori, A., Fujiki, H., 1997. Mechanisms of growth inhibition of human lung cancer cell line, PC-9, by tea polyphenols. *Japanese J. Cancer Res.* 88, 639–643.
- Okajima, K., Kashojiya, S., Tokutomi, S., 2012. Photosensitivity of kinase activation by blue light involves the lifetime of a cysteinyl-flavin adduct intermediate, S390, in the photoreaction cycle of the LOV2 domain in phototropin, a plant blue light receptor. *J. Biol. Chem.* 287, 40972–40981. <https://doi.org/10.1074/jbc.M112.406512>
- Okajima, K., Matsuoka, D., Tokutomi, S., 2011. LOV2-linker-kinase phosphorylates LOV1-containing N-terminal polypeptide substrate via photoreaction of LOV2 in *Arabidopsis* phototropin1. *FEBS Lett.* 585, 3391–3395. <https://doi.org/10.1016/j.febslet.2011.10.003>
- Okazaki, Y., Ishigami, M., Iwasaki, N., 2002. Temporal relationship between cytosolic free Ca^{2+} and membrane potential during hypotonic turgor regulation in a brackish water charophyte *Lamprothamnium succinctum*. *Plant Cell Physiol.* 43, 1027–1035. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcf127>
- Okazaki, Y., Iwasaki, N., 1991. Injection of a Ca^{2+} -chelating agent into the cytoplasm retards the progress of turgor regulation upon hypotonic treatment in the alga, *Lamprothamnium*. *Plant Cell Physiol.* 32, 185–194. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.pcp.a078063>
- Olsen, K.M., Lea, U.S., Slimestad, R., Verheul, M., Lillo, C., 2008. Differential expression of four *Arabidopsis* PAL genes; PAL1 and PAL2 have functional specialization in abiotic environmental-triggered flavonoid synthesis. *J. Plant Physiol.* 165, 1491–1499. <https://doi.org/10.1016/J.JPLPH.2007.11.005>
- Olson, G.E., Polk, H.C., 1977. In vitro effect of ascorbic acid on corticosteroid-caused neutrophil dysfunction. *J. Surg. Res.* 22, 109–112. [https://doi.org/10.1016/0022-4804\(77\)90048-8](https://doi.org/10.1016/0022-4804(77)90048-8)

- Olson, J.A., 1987. Recommended dietary intakes (RDI) of vitamin A in humans. *Am. J. Clin. Nutr.* 45, 704–716.
- Olson, J.A., Hodges, E., 1987. Recommended in humans dietary intakes (RDI) of vitamin C. *Am. J. Clin. Nutr.* 45, 693–703.
- Olympios, C.M., 1992. Soilless media under protected cultivation rookwool, peat, perlite and other substrates. *Acta Hortic.* 323, 215–234.
- Omar, S.A., Webb, A.J., Lundberg, J.O., Weitzberg, E., 2016. Therapeutic effects of inorganic nitrate and nitrite in cardiovascular and metabolic diseases. *J. Intern. Med.* 279, 315–336. <https://doi.org/10.1111/joim.12441>
- Ordookhani, K., Khavazi, K., Moezzi, A., Rejali, F., 2010. Influence of PGPR and AMF on antioxidant activity, lycopene and potassium contents in tomato. *African J. Agric. Res.* 5, 1108–1116. <https://doi.org/10.5897/AJAR09.183>
- Ordway, G.A., 2004. Myoglobin: an essential hemoprotein in striated muscle. *J. Exp. Biol.* 207, 3441–3446. <https://doi.org/10.1242/jeb.01172>
- Oren-shamir, M., Nissim-Levi, A., Ovadia, R., Kagan, S., Shaked-Sachray, L., 2003. Increased anthocyanin accumulation in flowers and foliage at elevated temperatures is affected by magnesium treatment. *Acta Hortic.* 624, 171–176. <https://doi.org/10.17660/acta-hortic.2003.624.22>
- Osterlund, M.T., Ang, L.H., Deng, X.W., 1999. The role of COP1 in repression of Arabidopsis photomorphogenic development. *Trends Cell Biol.* 9, 113–118. [https://doi.org/10.1016/S0962-8924\(99\)01499-3](https://doi.org/10.1016/S0962-8924(99)01499-3)
- Osterlund, M.T., Hardtke, C.S., Ning, W., Deng, X.W., 2000. Targeted destabilization of HY5 during light-regulated development of Arabidopsis. *Nature* 405, 462–466. <https://doi.org/10.1038/35013076>
- Oteiza, P.I., Erlejman, A.G., Verstraeten, S. V., Keen, C.L., Fraga, C.G., 2005. Flavonoid-membrane interactions: A protective role of flavonoids at the membrane surface? *Clin. Dev. Immunol.* 12, 19–25. <https://doi.org/10.1080/10446670410001722168>
- Otter, T., Polle, A., 1994. The influence of apoplastic ascorbate on the activities of cell wall-associated peroxidase and NADH oxidase in needles of Norway spruce (*picea abies* l.). *Plant Cell Physiol.* 35, 1231–1238. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.pcp.a078717>
- Ottosen, C.-O., Mortensen, L.M., Gislerød, H.R., 2002. Effect of relative air humidity on gas exchange, stomatal conductance and nutrient uptake in miniature potted roses. *Gartenbauwissenschaft* 67, 143–147.
- Ouzounis, T., Giday, H., Kjaer, K.H., Ottosen, C.O., 2018. LED or HPS in ornamentals? A case study in roses and campanulas. *Eur. J. Hortic. Sci.* 83, 166–172. <https://doi.org/10.17660/eJHS.2018/83.3.6>
- Ouzounis, T., Razi Parjikolaei, B., Frette, X., Rosenqvist, E., Ottosen, C.-O., 2015. Predawn and high intensity application of supplemental blue light decreases the quantum yield of PSII and enhances the amount of phenolic acids, flavonoids, and pigments in *Lactuca sativa*. *Front. Plant Sci.* 6, 1–14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00019>
- Ovaskainen, M.-L., Törrönen, R., Koponen, J.M., Sinkko, H., Hellström, J., Reinivuo, H., Mattila, P., 2008. Dietary intake and major food sources of polyphenols in Finnish adults. *J. Nutr.* 138, 562–566.
- Oyebode, O., Gordon-Dseagu, V., Walker, A., Mindell, J.S., 2014. Fruit and vegetable consumption and all-cause, cancer and CVD mortality: Analysis of health survey for England

- data. *J. Epidemiol. Community Health* 68, 856–862. <https://doi.org/10.1136/jech-2013-203500>
- Ozgová, Š., Heřmánek, J., Gut, I., 2003. Different antioxidant effects of polyphenols on lipid peroxidation and hydroxyl radicals in the NADPH-, Fe-ascorbate- and Fe-microsomal systems. *Biochem. Pharmacol.* 66, 1127–1137. [https://doi.org/10.1016/S0006-2952\(03\)00425-8](https://doi.org/10.1016/S0006-2952(03)00425-8)
- Pacher, P., Beckman, J.S., Liaudet, L., 2007. Nitric oxide and peroxynitrite in health and disease. *Physiol. Rev.* 87, 315–424. <https://doi.org/10.1152/physrev.00029.2006>
- Pacin, M., Legris, M., Casal, J.J., 2014. Rapid Decline in Nuclear COSTITUTIVE PHOTO-MORPHOGENESIS1 Abundance Anticipates the Stabilization of Its Target ELONGATED HYPOCOTYL5 in the Light. *Plant Physiol.* 164, 1134–1138. <https://doi.org/10.1104/pp.113.234245>
- Packer, L., 1993. Antioxidant action of carotenoids in vitro and in vivo and protection against oxidation of human low-density lipoproteins. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 691, 48–60. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1993.tb26156.x>
- Pacurar, D.I., Pacurar, M.L., Lakehal, A., Pacurar, A.M., Ranjan, A., Bellini, C., 2017. Erratum: The Arabidopsis Cop9 signalosome subunit 4 (CSN4) is involved in adventitious root formation. *Sci. Rep.* 7, 6435. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04861-9>
- Page, M., Sultana, N., Paszkiewicz, K., Florance, H., Smirnoff, N., 2012. The influence of ascorbate on anthocyanin accumulation during high light acclimation in *Arabidopsis thaliana*: Further evidence for redox control of anthocyanin synthesis. *Plant, Cell Environ.* 35, 388–404. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2011.02369.x>
- Paik, I., Kathare, P.K., Kim, J. Il, Huq, E., 2017. Expanding roles of PIFs in signal integration from multiple processes. *Mol. Plant* 10, 1035–1046. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2017.07.002>
- Palace, V.P., Khaper, N., Qin, Q., Singal, P.K., 1999. Antioxidant potentials of vitamin A and carotenoids and their relevance to heart disease. *Free Radic. Biol. Med.* 26, 746–761. [https://doi.org/10.1016/S0891-5849\(98\)00266-4](https://doi.org/10.1016/S0891-5849(98)00266-4)
- Palmer, S.C., Hayen, A., Macaskill, P., Pellegrini, F., Craig, J.C., Elder, G.J., Strippoli, G.F., 2011. Serum levels of phosphorus, parathyroid hormone, and calcium and risks of death. *JAMA* 305, 1119–1127. <https://doi.org/10.1001/jama.2011.308>
- Pamplona, R., 2008. Membrane phospholipids, lipoxidative damage and molecular integrity: A causal role in aging and longevity. *Biochim. Biophys. Acta - Bioenerg.* 1777, 1249–1262. <https://doi.org/10.1016/j.bbabi.2008.07.003>
- Pannala, A.S., Mani, A.R., Spencer, J.P.E., Skinner, V., Bruckdorfer, K.R., Moore, K.P., Rice-Evans, C.A., 2003. The effect of dietary nitrate on salivary, plasma, and urinary nitrate metabolism in humans. *Free Radic. Biol. Med.* 34, 576–584. [https://doi.org/10.1016/S0891-5849\(02\)01353-9](https://doi.org/10.1016/S0891-5849(02)01353-9)
- Papakonstantinou, E., Flatt, W.P., Huth, P.J., Harris, R.B.S., 2003. High dietary calcium reduces body fat content, digestibility of fat, and serum vitamin D in rats. *Obes. Res.* 11, 387–394. <https://doi.org/10.1038/oby.2003.52>
- Papandreou, M., Dimakopoulou, A., Cordopatis, P., Klimis-Zacas, D., Margarity, M., Lamari, F., 2009. Effect of polyphenol rich blueberry extract on cognitive performance of mice; concomitant changes of brain antioxidant markers and acetylcholinesterase. *Behav. Brain Res.* 198, 352–358. <https://doi.org/10.1055/s-0028-1084902>

- Papenbrock, J., Mock, H.P., Tanaka, R., Kruse, E., Grimm, B., 2000. Role of magnesium chelatase activity in the early steps of the tetrapyrrole biosynthetic pathway. *Plant Physiol.* 122, 1161–9.
- Park, J.S., Chyun, J.H., Kim, Y.K., Line, L.L., Chew, B.P., 2010. Astaxanthin decreased oxidative stress and inflammation and enhanced immune response in humans. *Nutr. Metab.* 7, 1–10. <https://doi.org/10.1186/1743-7075-7-18>
- Parks, B.M., Quail, P.H., 1993. HY8, a new class of arabidopsis long hypocotyl mutants deficient in functional phytochrome A. *Plant Cell* 5, 39–48. <https://doi.org/10.1105/tpc.5.1.39>
- Pascholati, S.F., Nicholson, R.L., Butler, L.T., 1986. Phenylalanine ammonia-lyase activity and anthocyanin accumulation in wounded maize mesocotyls. *J. Phytopathol.* 115, 165–172.
- Pase, M.P., Scholey, A.B., Pipingas, A., Kras, M., Nolidin, K., Gibbs, A., Wesnes, K., Stough, C., 2013. Cocoa polyphenols enhance positive mood states but not cognitive performance: A randomized, placebo-controlled trial. *J. Psychopharmacol.* 27, 451–458. <https://doi.org/10.1177/0269881112473791>
- Passardi, F., Cosio, C., Penel, C., Dunand, C., 2005. Peroxidases have more functions than a Swiss army knife. *Plant Cell Rep.* 24, 255–265. <https://doi.org/10.1007/s00299-005-0972-6>
- Passardi, F., Penel, C., Dunand, C., 2004. Performing the paradoxical: How plant peroxidases modify the cell wall. *Trends Plant Sci.* 9, 534–540. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2004.09.002>
- Pearse, S.J., Veneklaas, E.J., Cawthray, G.R., Bolland, M.D.A., Lambers, H., 2006. Carboxylate release of wheat, canola and 11 grain legume species as affected by phosphorus status. *Plant Soil* 288, 127–139. <https://doi.org/10.1007/s11104-006-9099-y>
- Peer, W.A., Bandyopadhyay, A., Blakeslee, J.J., Makam, S.N., Chen, R.J., Masson, P.H., Murphy, A.S., 2004. Variation in expression and protein localization of the PIN family of auxin efflux facilitator proteins in flavonoid mutants with altered auxin transport in *Arabidopsis thaliana*. *Plant Cell* 16, 1898–1911. <https://doi.org/10.1105/tpc.021501>
- Peer, W.A., Murphy, A.S., 2007. Flavonoids and auxin transport: modulators or regulators? *Trends Plant Sci.* 12, 556–563. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2007.10.003>
- Peeraer, Y., Rabijns, A., Collet, J.F., Van Schaftingen, E., De Ranter, C., 2004. How calcium inhibits the magnesium-dependent enzyme human phosphoserine phosphatase. *Eur. J. Biochem.* 271, 3421–3427. <https://doi.org/10.1111/j.0014-2956.2004.04277.x>
- Peng, N., Clark, J.T., Prasain, J., Kim, H., White, C.R., Wyss, J.M., 2005. Antihypertensive and cognitive effects of grape polyphenols in estrogen-depleted, female, spontaneously hypertensive rats. *Am. J. Physiol. Integr. Comp. Physiol.* 289, 771–775. <https://doi.org/10.1152/ajp-regu.00147.2005>
- Penningsfeld, F., 1983. Kultursubstrate für den Gartenbau, besonders in Deutschland: Ein kritischer Überblick. *Plant Soil* 75, 269–281.
- Pennisi, G., Blasioli, S., Cellini, A., Maia, L., Crepaldi, A., Braschi, I., Spinelli, F., Nicola, S., Fernandez, J.A., Stanghellini, C., Marcelis, L.F.M., Orsini, F., Gianquinto, G., 2019. Unraveling the role of red:blue LED lights on resource use efficiency and nutritional properties of indoor grown sweet basil. *Front. Plant Sci.* 10, 1–14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00305>
- Percival, G.C., Fraser, G.A., 2001. Measurement of the salinity and freezing tolerance of *Crataegus* genotypes using chlorophyll fluorescence. *J. Arboric.* 27, 233–245.
- Pereira, C., Barbosa, R.M., Laranjinha, J., 2015. Dietary nitrite induces nitrosation of the gastric mucosa: the protective action of the mucus and the modulatory effect of red wine. *J. Nutr.*

- Biochem. 26, 476–483. <https://doi.org/10.1016/J.JNUTBIO.2014.12.004>
- Pereira, E.G., Oliva, M.A., Siqueira-Silva, A.I., Rosado-Souza, L., Pinheiro, D.T., Almeida, A.M., 2013. Iron excess affects rice photosynthesis through stomatal and non-stomatal limitations. *Plant Sci.* 201–202, 81–92. <https://doi.org/10.1080/01904167.2014.888744>
- Pérez-Jiménez, J., Fezeu, L., Touvier, M., Arnault, N., Manach, C., Hercberg, S., Galan, P., Scalbert, A., 2011. Dietary intake of 337 polyphenols in French adults. *Am. J. Clin. Nutr.* 93, 1220–1228. <https://doi.org/10.3945/ajcn.110.007096>
- Pérez-López, U., Miranda-Apodaca, J., Muñoz-Rueda, A., Mena-Petite, A., 2013. Lettuce production and antioxidant capacity are differentially modified by salt stress and light intensity under ambient and elevated CO₂. *J. Plant Physiol.* 170, 1517–1525. <https://doi.org/10.1016/J.JPLPH.2013.06.004>
- Peter, C.J., Fischer, L.K., Kundakovic, M., Garg, P., Jakovcevski, M., Dincer, A., Amaral, A.C., Ginns, E.I., Galdzicka, M., Bryce, C.P., Ratner, C., Waber, D.P., Mokler, D., Medford, G., Champagne, F.A., Rosene, D.L., McGaughy, J.A., Sharp, A.J., Galler, J.R., Akbarian, S., 2016. DNA methylation signatures of early childhood malnutrition associated with impairments in attention and cognition. *Biol. Psychiatry* 80, 765–774. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2016.03.2100>
- Petersen, J., Inoue, S. ichiro, Kelly, S.M., Sullivan, S., Kinoshita, T., Christie, J.M., 2017. Functional characterization of a constitutively active kinase variant of Arabidopsis phototropin 1. *J. Biol. Chem.* 292, 13843–13852. <https://doi.org/10.1074/jbc.M117.799643>
- Peunova, N., Enikolopov, G., 1993. Amplification of calcium-induced gene transcription by nitric oxide in neuronal cells. *Nature* 364, 450–453.
- Peyrat-Maillard, M.N., Cuvelier, M.E., Berset, C., 2003. Antioxidant activity of phenolic compounds in 2,2'-azobis (2-amidinopropane) dihydrochloride (AAPH)-induced oxidation: synergistic and antagonistic effects. *J. Am. Oil Chem. Soc.* 80, 1007–1012. <https://doi.org/10.1007/s11746-003-0812-z>
- Pfannschmidt, T., 2005. Acclimation to varying light qualities: Toward the functional relationship of state transitions and adjustment of photosystem stoichiometry. *J. Phycol.* 41, 723–725. <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2005.00116.x>
- Phaniendra, A., Jestadi, D.B., Periyasamy, L., 2015. Free radicals: properties, sources, targets, and their implication in various diseases. *Indian J. Clin. Biochem.* 30, 11–26. <https://doi.org/10.1007/s12291-014-0446-0>
- Phee, B.-K., Kim, J.-I., Shin, D.H., Yoo, J., Park, K.-J., Han, Y.-J., Kwon, Y.-K., Cho, M.-H., Jeon, J.-S., Bhoo, S.H., Hahn, T.-R., 2008. A novel protein phosphatase indirectly regulates PHYTOCHROME-INTERACTING FACTOR 3 via phytochrome. *Biochem. J.* 415, 247–255.
- Phillips, M.A., León, P., Boronat, A., Rodríguez-Concepción, M., 2008. The plastidial MEP pathway: unified nomenclature and resources. *Trends Plant Sci.* 13, 619–623. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2008.09.003>
- Phosritong, P., Daduang, J., Leelayuwat, C., Sangka, A., Tavichakorntrakool, R., Boonsiri, P., 2014. Determination of oxalate content in thai herbal teas and local vegetables, in: 34th The National Graduate Research Conference. pp. 1064–1072.
- Pierik, R., Djakovic-Petrovic, T., Keuskamp, D.H., De Wit, M., Voesenek, L.A.C.J., 2009. Auxin and ethylene regulate elongation responses to neighbor proximity signals independent of gibberellin and DELLA proteins in Arabidopsis. *Plant Physiol.* 149, 1701–1712. <https://doi.org/10.1104/pp.108.133496>

- Pierik, R., Whitelam, G.C., Voesenek, L.A.C.J., De Kroon, H., Visser, E.J.W., 2004. Canopy studies on ethylene-insensitive tobacco identify ethylene as a novel element in blue light and plant-plant signalling. *Plant J.* 38, 310–319. <https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2004.02044.x>
- Pietrini, F., Iannelli, M.A., Massacci, A., 2002. Anthocyanin accumulation in the illuminated surface of maize leaves enhances protection from photo-inhibitory risks at low temperature, without further limitation to photosynthesis. *Plant, Cell Environ.* 25, 1251–1259. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2002.00917.x>
- Pietrini, F., Massacci, A., 1998. Leaf anthocyanin content changes in *Zea mays* L. grown at low temperature: Significance for the relationship between the quantum yield of PS II and the apparent quantum yield of CO₂ assimilation. *Photosynth. Res.* 58, 213–219. <https://doi.org/10.1023/A:1006152610137>
- Pineros, M., Tester, M., 1997. Calcium channels in higher plant cells: Selectivity, regulation and pharmacology. *J. Exp. Bot.* 48, 551–577. https://doi.org/10.1093/jxb/48.Special_Issue.551
- Pinto, E., Sigaud- Kutner, T.C.S., Leitao, M.A.S., Okamoto, O.K., Morse, D., 2003. Heavy metal-induced oxidative stress in algae. *J. Phycol.* 39, 1008–1018. <https://doi.org/10.1111/j.0022-3646.2003.02-193.x>
- Piovene, C., Orsini, F., Bosi, S., Sanoubar, R., Bregola, V., Dinelli, G., Gianquinto, G., 2015. Optimal red: Blue ratio in led lighting for nutraceutical indoor horticulture. *Sci. Hortic. (Amsterdam)*. 193, 202–208. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.07.015>
- Piper, W., 2013. Störungen des Säure-Base-Haushalts, in: *Innere Medizin*. pp. 272–278.
- Platten, J.D., Foo, E., Elliott, R.C., Hecht, V., Reid, J.B., Weller, J.L., 2005. Cryptochrome 1 contributes to blue-light sensing in *Pea*. *Plant Physiol.* 139, 1472–1482. <https://doi.org/10.1104/pp.105.067462>
- Pobel, D., Riboli, E., Cornée, J., Hémon, B., Guyader, M., 1995. Nitrosamine, nitrate and nitrite in relation to gastric cancer: A case-control study in Marseille, France. *Eur. J. Epidemiol.* 11, 67–73. <https://doi.org/10.1007/BF01719947>
- Pogson, B., McDonald, K.A., Truong, M., Britton, G., DellaPenna, D., 1996. Arabidopsis carotenoid mutants demonstrate that lutein is not essential for photosynthesis in higher plants. *Plant Cell* 8, 1627–1639. <https://doi.org/10.2307/3870255>
- Pokhilko, A., Bou-Torrent, J., Pulido, P., Rodríguez-Concepción, M., Ebenhöf, O., 2015. Mathematical modelling of the diurnal regulation of the MEP pathway in Arabidopsis. *New Phytol.* 206, 1075–1085. <https://doi.org/10.1111/nph.13258>
- Pokluda, R., 2003. Comparison of selected characteristics of root parsley cultivars. *Hortic. Sci.* 30, 67–72.
- Polisensky, D.H., Braam, J., 1996. Cold-shock regulation of the Arabidopsis TCH genes and the effects of modulating intracellular calcium levels. *Plant Physiol.* 111, 1271–1279. <https://doi.org/10.1104/pp.111.4.1271>
- Ponka, P., Beaumont, C., Richardson, D.R., 1998. Function and regulation of transferrin and ferritin. *Semin. Hematol.* 35, 35–54.
- Pons, T.L., Jordi, W., Kuiper, D., 2001. Acclimation of plants to light gradients in leaf canopies: Evidence for a possible role for cytokinins transported in the transpiration stream. *J. Exp. Bot.* 52, 1563–1574. <https://doi.org/10.1093/jexbot/52.360.1563>
- Pons, T.L., Welschen, R.A.M., 2003. Midday depression of net photosynthesis in the tropical

- rainforest tree *Eperua grandiflora*: contributions of stomatal and internal conductances, respirations and Rubisco functioning. *Tree Physiol.* 23, 937–947.
- Potter, T.I., Rood, S.B., Zanewich, K.P., 1999. Light intensity, gibberellin content and the resolution of shoot growth in Brassica. *Planta* 207, 505–511. <https://doi.org/10.1007/s004250050510>
- Poulsen, H.E., Prieme, H., Loft, S., 1998. Role of oxidative DNA damage in cancer initiation and promotion. *Eur. J. Cancer Prev.* 7, 9–16.
- Pourcel, L., Routaboul, J.M., Cheynier, V., Lepiniec, L., Debeaujon, I., 2007. Flavonoid oxidation in plants: from biochemical properties to physiological functions. *Trends Plant Sci.* 12, 29–36. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2006.11.006>
- Powers, L., Chance, B., Ching, Y., Angiolillo, P., 1981. Structural features and the reaction mechanism of cytochrome oxidase: iron and copper X-ray absorption fine structure. *Biophys. J.* 34, 465–498. [https://doi.org/10.1016/S0006-3495\(81\)84863-1](https://doi.org/10.1016/S0006-3495(81)84863-1)
- Powers, S.K., Nelson, W.B., Hudson, M.B., 2011. Exercise-induced oxidative stress in humans: Cause and consequences. *Free Radic. Biol. Med.* 51, 942–950. <https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2010.12.009>
- Prince, R.L., Devine, A., Dhaliwal, S.S., Dick, I.M., 2006. Effects of calcium supplementation on clinical fracture and bone structure. *Arch. Intern. Med.* 166, 869–875. <https://doi.org/10.1001/archinte.166.8.869>
- Procko, C., Burko, Y., Jaillais, Y., Ljung, K., Long, J.A., Chory, J., 2016. The epidermis coordinates auxin-induced stem growth in response to shade. *Genes Dev.* 30, 1529–1541. <https://doi.org/10.1101/gad.283234.116>
- Proietti, S., Moscatello, S., Colla, G., Battistelli, A., 2004. The effect of growing spinach (*Spinacia oleracea* L.) at two light intensities on the amounts of oxalate, ascorbate and nitrate in their leaves. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* 79, 606–609. <https://doi.org/10.1080/14620316.2004.11511814>
- Prokopy, R.J., Owens, E.D., 1983. Visual detection of plants by herbivores insects. *Annu. Rev. Entomol.* 28, 337–364.
- Pryor, W.A., Squadrito, G.L., 1995. The chemistry of peroxynitrite: a product from the reaction of nitric oxide with superoxide. *Am. J. Physiol.* 268, 699–722. <https://doi.org/10.1152/ajplung.1995.268.5.L699>
- Psotová, J., Chlopčíková, Š., Miketová, P., Hrbáč, J., Šimánek, V., 2004. Chemoprotective effect of plant phenolics against anthracycline-induced toxicity on rat cardiomyocytes. Part III. Apigenin, baicalein, kaempferol, luteolin and quercetin. *Phyther. Res.* 18, 516–521. <https://doi.org/10.1002/ptr.1462>
- Puthongsiriporn, U., Scheideler, S.E., Sell, J.L., Beck, M.M., 2001. Effects of vitamin E and C supplementation on performance, in vitro lymphocyte proliferation, and antioxidant status of laying hens during heat stress. *Poult. Sci.* 80, 1190–1200. <https://doi.org/10.1093/ps/80.8.1190>
- Putnam, C.D., Arvai, A.S., Bourne, Y., Tainer, J.A., 2000. Active and inhibited human catalase structures: Ligand and NADPH binding and catalytic mechanism. *J. Mol. Biol.* 296, 295–309. <https://doi.org/10.1006/jmbi.1999.3458>
- Putthawan, P., Poeaim, S., Areekul, V., 2017. Cytotoxic activity and apoptotic induction of some edible Thai local plant extracts against colon and liver cancer cell lines. *Trop. J. Pharm. Res.* 16, 2927–2933. <https://doi.org/10.4314/tjpr.v16i12.17>

- Qin, M., Kuhn, R., Moran, S., Quail, P.H., 1997. Overexpressed phytochrome C has similar photosensory specificity to phytochrome B but a distinctive capacity to enhance primary leaf expansion. *Plant J.* 12, 1163–1172. <https://doi.org/10.1046/j.1365-313X.1997.12051163.x>
- Qin, X., Zeevaert, J.A., 1999. The 9-cis-epoxycarotenoid cleavage reaction is the key regulatory step of abscisic acid biosynthesis in water-stressed bean. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 96, 15354–61.
- Qu, X., Jin, F., Hao, Y., Li, H., Tang, T., Wang, H., Yan, W., Dai, K., 2013. Magnesium and the risk of cardiovascular events: a meta-analysis of prospective cohort studies. *PLoS One* 8, 1–13. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0057720>
- Quail, P.H., 2002. Phytochrome photosensory signalling networks. *Nat. Rev. Mol. Cell Biol.* 3, 85–93. <https://doi.org/10.1038/nrm728>
- Quail, P.H., Boylan, M.T., Parks, B.M., Short, T.W., Xu, Y., Wagner, D., 1995. Phytochromes: Photosensory perception and signal transduction. *Science* (80-.). 268, 675–680.
- Radek, M., Savage, G.P., 2008. Oxalates in some Indian green leafy vegetables. *Int. J. Food Sci. Nutr.* 59, 246–260. <https://doi.org/10.1080/09637480701791176>
- Raha, S., Robinson, B.H., 2000. Mitochondria, oxygen free radicals, disease and ageing. *Trends Biochem. Sci.* 25, 502–508. [https://doi.org/10.1016/S0968-0004\(00\)01674-1](https://doi.org/10.1016/S0968-0004(00)01674-1)
- Rahayu, Y.S., Walch-Liu, P., Neumann, G., Römheld, V., Von Wirén, N., Bangerth, F., 2005. Root-derived cytokinins as long-distance signals for NO₃--induced stimulation of leaf growth. *J. Exp. Bot.* 56, 1143–1152. <https://doi.org/10.1093/jxb/eri107>
- Rajapakse, N.C., Kelly, J.W., 1995. Spectral filters and growing season influence growth and carbohydrate status of Chrysanthemum. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 120, 78–83.
- Rajapakse, N.C., Young, R.E., McMahon, M.J., Oi, R., 1999. Plant height control by photoselective filters: Current status and future prospects. *Horttechnology* 9, 618–624.
- Ramel, F., Birtic, S., Ginies, C., Soubigou-Taconnat, L., Triantaphylides, C., Havaux, M., 2012. Carotenoid oxidation products are stress signals that mediate gene responses to singlet oxygen in plants. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 109, 5535–5540. <https://doi.org/10.1073/pnas.1115982109>
- Randall, W.C., Lopez, R.G., 2015. Comparison of bedding plant seedlings grown under sole-source light-emitting diodes (LEDs) and greenhouse supplemental lighting from LEDs and high-pressure sodium lamps. *HortScience* 50, 705–713. <https://doi.org/10.21273/hortsci.50.5.705>
- Rangcai, Y., Ruichi, P., 1997. Effects of blue light on the growth and levels of endogenous phytohormones in rice (*Oryza sativa*) L. seedlings. *Acta Physiol. Sin.* 23, 175–180.
- Ranjbar, A., Pasalar, P., Abdollahi, M., 2002. Induction of oxidative stress and acetylcholinesterase inhibition in organophosphorous pesticide manufacturing workers. *Hum. Exp. Toxicol.* 21, 179–182. <https://doi.org/10.1191/0960327102ht238oa>
- Rao, I.M., Sharp, R.E., Boyer, J.S., 1987. Leaf magnesium alters photosynthetic response to low water potentials in sunflower. *Biochim. Biophys. Acta* 84, 1214–1219.
- Rao, I.M., Terry, N., 1995. Leaf phosphate status, photosynthesis, and carbon partitioning in sugar beet: IV. Changes with time following increased supply of phosphate to low-phosphate plants. *Plant Physiol.* 107, 1313–1321. <https://doi.org/10.1104/pp.107.4.1313>
- Rao, L.V.M., Datta, N., Sopory, S.K., Guha-Mukherjee, S., 1980. Phytochrome mediated induction of nitrate reductase activity in etiolated maize leaves. *Physiol. Plant.* 50, 208–212.
- Rasmussen, C.B., Hiner, A.N.P., Smith, A.T., Welinder, K.G., 2002. Effect of calcium, other

- ions, and pH on the reactions of barley peroxidase with hydrogen peroxide and fluoride. *J. Biol. Chem.* 273, 2232–2240. <https://doi.org/10.1074/jbc.273.4.2232>
- Ravanat, J.L., Cadet, J., 1995. Reaction of Singlet Oxygen with 2'-Deoxyguanosine and DNA. Isolation and Characterization of the Main Oxidation Products. *Chem. Res. Toxicol.* 8, 379–388. <https://doi.org/10.1021/tx00045a009>
- Ravanat, J.L., Martinez, G.R., Medeiros, M.H.G., Di Mascio, P., Cadet, J., 2006. Singlet oxygen oxidation of 2'-deoxyguanosine. Formation and mechanistic insights. *Tetrahedron* 62, 10709–10715. <https://doi.org/10.1016/j.tet.2006.08.097>
- Ravet, K., Pilon, M., 2013. Copper and iron homeostasis in plants: The challenges of oxidative stress. *Antioxid. Redox Signal.* 19, 919–932. <https://doi.org/10.1089/ars.2012.5084>
- Ravindran, V., Ravindran, G., Sivalogan, S., 1994. Total and phytate phosphorus contents of various foods and feedstuffs of plant origin. *Food Chem.* 50, 133–136. [https://doi.org/10.1016/0308-8146\(94\)90109-0](https://doi.org/10.1016/0308-8146(94)90109-0)
- Rebouche, C.J., 1991. Ascorbic acid and carnitine biosynthesis. *Am. J. Clin. Nutr.* 54, 1147–1152.
- Record, I.R., Dreosti, I.E., McInerney, J.K., 2001. Changes in plasma antioxidant status following consumption of diets high or low in fruit and vegetables or following dietary supplementation with an antioxidant mixture. *Br. J. Nutr.* 85, 459–464. <https://doi.org/10.1079/bjn2000292>
- Reem, N.T., Pogorelko, G., Lionetti, V., Chambers, L., Held, M.A., Bellincampi, D., Zabolina, O.A., 2016. Decreased polysaccharide feruloylation compromises plant cell wall integrity and increases susceptibility to necrotrophic fungal pathogens. *Front. Plant Sci.* 7, 1–15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00630>
- Reich, P.B., Oleksyn, J., Wright, I.J., 2009. Leaf phosphorus influences the photosynthesis-nitrogen relation: A cross-biome analysis of 314 species. *Oecologia* 160, 207–212. <https://doi.org/10.1007/s00442-009-1291-3>
- Reid, D.M., Clements, J.B., Carr, D.J., 1968. Red light induction of gibberellin synthesis in leaves. *Nature* 217, 580–582.
- Reinhardt, K., Smith, W.K., Carter, G.A., 2010. Clouds and cloud immersion alter photosynthetic light quality in a temperate mountain cloud forest. *Botany* 88, 462–470. <https://doi.org/10.1139/B10-008>
- Rentel, M.C., Knight, M.R., 2004. Oxidative stress-induced calcium signaling in Arabidopsis. *Plant Physiol.* 135, 1471–1479. <https://doi.org/10.1104/pp.104.042663.1>
- Reuber, S., Bornman, J.F., Weissenböck, G., 1996. Phenylpropanoid compounds in primary leaf tissues of rye (*Secale cereale*). Light response of their metabolism and the possible role in UV-B protection. *Physiol. Plant.* 97, 160–168. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1996.tb00492.x>
- Ribeiro, R.V., Machado, E.C., Oliveira, R.F. de, 2006. Temperature response of photosynthesis and its interaction with light intensity in sweet orange leaf discs under non-photorespiratory condition. *Ciência e Agrotecnologia* 30, 670–678. <https://doi.org/10.1590/s1413-70542006000400012>
- Ricard, D., L'Her, M., Richard, P., Boitrel, B., 2001. Iron porphyrins as models of cytochrome c oxidase. *Chem. - A Eur. J.* 7, 3291–3297. [https://doi.org/10.1002/1521-3765\(20010803\)7:15<3291::AID-CHEM3291>3.0.CO;2-9](https://doi.org/10.1002/1521-3765(20010803)7:15<3291::AID-CHEM3291>3.0.CO;2-9)
- Rice-evans, C.A., Miller, N.J., Bolwell, P.G., Bramley, P.M., Pridham, J.B., 1995. The relative

- antioxidant activities of plant-derived polyphenolic flavonoids. *Free Radic. Res.* 22, 375–383. <https://doi.org/10.3109/10715769509145649>
- Richardson, A.E., Hadobas, P.A., Hayes, J.E., 2001. Extracellular secretion of *Aspergillus* phytase from *Arabidopsis* roots enables plants to obtain phosphorus from phytate. *Plant J.* 25, 641–649.
- Richardson, A.E., Hadobas, P.A., Hayes, J.E., 2000. Acid phosphomonoesterase and phytase activities of wheat (*Triticum aestivum* L.) roots and utilization of organic phosphorus substrates by seedlings grown in sterile culture. *Plant, Cell Environ.* 23, 397–405. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2000.00557.x>
- Richter, G., Wessel, K., 1985. Red light inhibits blue light-induced chloroplast development in cultured plant cells at the mRNA level. *Plant Mol. Biol.* 5, 175–182. <https://doi.org/10.1007/BF00015681>
- Riedell, W.E., 2010. Mineral-nutrient synergism and dilution responses to nitrogen fertilizer in field-grown maize. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 173, 869–874. <https://doi.org/10.1002/jpln.200900218>
- Riefler, M., Novak, O., Strnad, M., Schmölling, T., 2006. *Arabidopsis* cytokinin receptor mutants reveal functions in shoot growth, leaf senescence, seed size, germination, root development, and cytokinin metabolism. *Plant Cell* 18, 40–54. <https://doi.org/10.1105/tpc.105.037796.1>
- Rinalducci, S., Pedersen, J.Z., Zolla, L., 2004. Formation of radicals from singlet oxygen produced during photoinhibition of isolated light-harvesting proteins of photosystem II. *Biochim. Biophys. Acta - Bioenerg.* 1608, 63–73. <https://doi.org/10.1016/j.bbabi.2003.10.009>
- Rincon, M., Hanson, J.B., 1986. Controls on calcium ion fluxes in injured or shocked corn root cells: Importance of proton pumping and cell membrane potential. *Physiol. Plant.* 67, 576–583. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1986.tb05058.x>
- Riou-Khamlichi, C., Huntley, R., Jacqumard, A., Murray, J.A.H., 1999. Cytokinin activation of *Arabidopsis* cell division through a D-type cyclin. *Science* (80-.). 283, 1541–1544. <https://doi.org/10.1126/science.283.5407.1541>
- Ripley, B.S., Redfern, S.P., Dames, J., 2004. Quantification of the photosynthetic performance of phosphorus-deficient *Sorghum* by means of chlorophyll-a fluorescence kinetics. *S. Afr. J. Sci.* 100, 615–618.
- Rizhsky, L., Hallak-Herr, E., Van Breusegem, F., Rachmilevitch, S., Barr, J.E., Rodermel, S., Inzé, D., Mittler, R., 2002. Double antisense plants lacking ascorbate peroxidase and catalase are less sensitive to oxidative stress than single antisense plants lacking ascorbate peroxidase or catalase. *Plant J.* 32, 329–342. <https://doi.org/10.1046/j.1365-313X.2002.01427.x>
- Rizwan, M., Rodriguez-Blanco, I., Harbottle, A., Birch-Machin, M.A., Watson, R.E.B., Rhodes, L.E., 2011. Tomato paste rich in lycopene protects against cutaneous photodamage in humans in vivo: A randomized controlled trial. *Br. J. Dermatol.* 164, 154–162. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2133.2010.10057.x>
- Rizzini, L., Favory, J.-J., Cloix, C., Faggionato, D., O'Hara, A., Kaiserli, E., Baumeister, R., Schafer, E., Nagy, F., Jenkins, G.I., Ulm, R., 2011. Perception of UV-B by the *Arabidopsis* UVR8 protein. *Science* (80-.). 332, 103–106. <https://doi.org/10.1126/science.1200660>
- Robak, J., Gryglewski, R.J., 1988. Flavonoids are scavengers of superoxide anions. *Biochem. Pharmacol.* 37, 837–841.

- Robards, K., Antolovich, M., 1997. Analytical chemistry of fruit bioflavonoids. A review. *Analyst* 122, 11–34. <https://doi.org/10.1039/a606499j>
- Robbins, C.T., Mole, S., Hagerman, A.E., Hanley, T.A., 1987. Role of tannins in defending plants against ruminants: reduction in dry matter digestion? *Ecology* 68, 1606–1615.
- Robertson, G.W., 1966. The light composition of solar and sky spectra available to plants. *Ecology* 47, 640–643.
- Robertson, R.A., 1993. Peat, horticulture and environment. *Biodivers. Conserv.* 2, 541–547. <https://doi.org/10.1007/BF00056747>
- Robin, P., Cardenas-Navarro, R., Adamowicz, S., 1999. Nitrate accumulation in plants: a role for water. *J. Exp. Bot.* 50, 613–624. <https://doi.org/10.1093/jxb/50.334.613>
- Robinson, J.M., 1988. Does O₂ photoreduction occur within chloroplasts in vivo? *Physiol. Plant.* 72, 666–680. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1988.tb09181.x>
- Rocha, B.S., Gago, B., Barbosa, R.M., Lundberg, J.O., Radi, R., Laranjinha, J., 2012. Intra-gastric nitration by dietary nitrite: Implications for modulation of protein and lipid signaling. *Free Radic. Biol. Med.* 52, 693–698. <https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2011.11.011>
- Rochaix, J.D., 2011. Reprint of: Regulation of photosynthetic electron transport. *Biochim. Biophys. Acta - Bioenerg.* 1807, 878–886. <https://doi.org/10.1016/j.bbabi.2011.05.009>
- Roderick, M.L., Farquhar, G.D., Berry, S.L., Noble, I.R., 2001. On the direct effect of clouds and atmospheric particles on the productivity and structure of vegetation. *Oecologia* 129, 21–30. <https://doi.org/10.1007/s004420100760>
- Rodrigues, S.L., Baldo, M.P., Machado, R.C., Forechi, L., Molina, M. del C.B., Mill, J.G., 2014. High potassium intake blunts the effect of elevated sodium intake on blood pressure levels. *J. Am. Soc. Hypertens.* 8, 232–238. <https://doi.org/10.1016/J.JASH.2014.01.001>
- Rodriguez-Concepcion, M., Fores, O., Martinez-Garcia, J.F., Gonzalez, V., Phillips, M.A., Ferrer, A., Boronat, A., 2004. Distinct light-mediated pathways regulate the biosynthesis and exchange of isoprenoid precursors during Arabidopsis seedling development. *Plant Cell* 16, 144–156. <https://doi.org/10.1105/tpc.016204>
- Rodríguez-Rodríguez, E., Lombán, B.N., Lólpez-Sobaler, R.M., 2010. Review and future perspectives on recommended calcium intake. *Nutr. Hosp.* 25, 366–374. <https://doi.org/10.3305/nh.2010.25.3.4585>
- Rodríguez-Villalón, A., Gas, E., Rodríguez-Concepción, M., 2009a. Phytoene synthase activity controls the biosynthesis of carotenoids and the supply of their metabolic precursors in dark-grown Arabidopsis seedlings. *Plant J.* 60, 424–435. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3113.2009.03966.x>
- Rodríguez-Villalón, A., Gas, E., Rodríguez-Concepción, M., 2009b. Colors in the dark: A model for the regulation of carotenoid biosynthesis in etioplasts. *Plant Signal. Behav.* 4, 965–967. <https://doi.org/10.4161/psb.4.10.9672>
- Rogers, M.A.M., Vaughan, T.L., Davis, S., Thomas, D.B., 1995. Consumption of nitrate, nitrite, and nitrosodimethylamine and the risk of upper aerodigestive tract cancer. *Cancer Epidemiol. Biomarkers Prev.* 4, 29–36.
- Roig-Villanova, I., Bou-Torrent, J., Galstyan, A., Carretero-Paulet, L., Portolés, S., Rodríguez-Concepción, M., Martínez-García, J.F., 2007. Interaction of shade avoidance and auxin responses: A role for two novel atypical bHLH proteins. *EMBO J.* 26, 4756–4767. <https://doi.org/10.1038/sj.emboj.7601890>

- Roig-Villanova, I., Bou, J., Sorin, C., Devlin, P.F., Martinez-Garcia, J.F., 2006. Identification of primary target genes of phytochrome signaling. Early transcriptional control during shade avoidance responses in *Arabidopsis*. *Plant Physiol.* 141, 85–96. <https://doi.org/10.1104/pp.105.076331>.photointerconvertible
- Roldán-Arjona, T., Ariza, R.R., 2009. Repair and tolerance of oxidative DNA damage in plants. *Mutat. Res. Mutat. Res.* 681, 169–179. <https://doi.org/10.1016/J.MRREV.2008.07.003>
- Romero-Puertas, M.C., Palma, J.M., Gómez, M., Del Río, L.A., Sandalio, L.M., 2002. Cadmium causes the oxidative modification of proteins in pea plants. *Plant, Cell Environ.* 25, 677–686. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2002.00850.x>
- Römheld, V., Kirkby, E.A., 2007. Magnesium functions in crop nutrition and yield, in: *Proceedings of a Conference in Cambridge*. pp. 151–171.
- Rosenzweig, C., Elliott, J., Deryng, D., Ruane, A.C., Müller, C., Arneth, A., Boote, K.J., Folberth, C., Glotter, M., Khabarov, N., Neumann, K., Piontek, F., Pugh, T.A.M., Schmid, E., Stehfest, E., Yang, H., Jones, J.W., 2014. Assessing agricultural risks of climate change in the 21st century in a global gridded crop model intercomparison. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 111, 3268–3273. <https://doi.org/10.1073/pnas.1222463110>
- Ross, A.C., 2012. Vitamin A and retinoic acid in T cell-related immunity 1-4 A Catharine Ross. *Am. J. Clin. Nutr.* 96, 1166–1172. <https://doi.org/10.3945/ajcn.112.034637>
- Roth, J.A., Kaeberle, M.L., 1985. In vivo effect of ascorbic acid on neutrophil function in healthy and dexamethasone-treated cattle. *Am. J. Vet. Res.* 46, 2434–2436.
- Roubelakis-Angelakis, K.A., Kliewer, W.M., 1986. Effects of exogenous factors on phenylalanine ammonia-lyase activity and accumulation of anthocyanins and total phenolics in grape berries. *Am. J. Enol. Vitic.* 37, 275–280.
- Roxas, V.P., Lodhi, S.A., Garrett, D.K., Mahan, J.R., Allen, R.D., 2000. Stress tolerance in transgenic tobacco seedlings that overexpress glutathione S-transferase/glutathione peroxidase. *Plant Cell Physiol.* 41, 1229–1234. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcp051>
- Rude, R.K., Kirchen, M.E., Gruber, H.E., Meyer, H.E., Luck, J.S., Crawford, D.L., 1999. Magnesium deficiency-induced osteoporosis in the rat: uncoupling of bone formation and bone resorption. *Magnesium Res.* 12, 257–267.
- Ruff, H.A., Markowitz, M.E., Bijur, P.E., Rosen, J.F., 1996. Relationships among blood lead levels, iron deficiency, and cognitive development in two-year-old children. *Environ. Health Perspect.* 104, 180–185. <https://doi.org/10.1289/ehp.96104180>
- Ruiz, N., Ward, D., Saltz, D., 2002. Calcium oxalate crystals in leaves of *Pancreaticum sickenbergeri*: constitutive or induced defence? *Funct. Ecol.* 16, 99–105.
- Rumak, I., Gieczewska, K., Kierdaszuk, B., Gruszecki, W.I., Mostowska, A., Mazur, R., Garstka, M., 2010. 3-D modelling of chloroplast structure under (Mg²⁺) magnesium ion treatment. Relationship between thylakoid membrane arrangement and stacking. *Biochim. Biophys. Acta - Bioenerg.* 1797, 1736–1748. <https://doi.org/10.1016/j.bbabi.2010.07.001>
- Rungrat, T., Awlia, M., Brown, T., Cheng, R., Sirault, X., Fajkus, J., Trtilek, M., Furbank, B., Badger, M., Tester, M., Pogson, B.J., Borevitz, J.O., Wilson, P., 2016. Using phenomic analysis of photosynthetic function for abiotic stress response gene discovery. *Arab. B.* e0185, 1–12. <https://doi.org/10.1199/tab.0185>
- Runkle, E.S., Heins, R.D., 2003. Photocontrol of flowering and extension growth in the long-day plant pansy. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 128, 479–485. <https://doi.org/10.21273/jashs.128.4.0479>

- Runkle, E.S., Heins, R.D., 2001. Specific functions of red, far red, and blue light in flowering and stem extension of long-day plants. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 126, 275–282.
- Ryan, K.G., Swinny, E.E., Markham, K.R., Winefield, C., 2002. Flavonoid gene expression and UV photoprotection in transgenic and mutant *Petunia* leaves. *Phytochemistry* 59, 23–32. [https://doi.org/10.1016/S0031-9422\(01\)00404-6](https://doi.org/10.1016/S0031-9422(01)00404-6)
- Ryan, K.G., Swinny, E.E., Winefield, C., Markham, K.R., 2001. Flavonoids and UV Photoprotection in 1–10.
- Saad, R., Khan, J., Krishnanmurthi, V., Asmani, F., Yusuf, E., 2014. Effect of different extraction techniques of *Persicaria odorata* extracts utilizing anti-bacterial bioassay. *Br. J. Pharm. Res.* 4, 2146–2154. <https://doi.org/10.9734/BJPR/2014/12232>
- Sabu, M.C., Smitha, K., Kuttan, R., 2002. Anti-diabetic activity of green tea polyphenols and their role in reducing oxidative stress in experimental diabetes. *J. Ethnopharmacol.* 83, 109–116. [https://doi.org/10.1016/S0378-8741\(02\)00217-9](https://doi.org/10.1016/S0378-8741(02)00217-9)
- Saengtharatin, S., Goto, N., Kozai, T., Yamori, W., 2018. Green light penetrates inside crisp head lettuce leading to chlorophyll and ascorbic acid content enhancement, in: 30th International Horticultural Congress.
- Sahni, S., Cupples, L.A., McLean, R.R., Tucker, K.L., Broe, K.E., Kiel, D.P., Hannan, M.T., 2010. Protective effect of high protein and calcium intake on the risk of hip fracture in the Framingham Offspring cohort. *J. Bone Miner. Res.* 25, 2770–2776. <https://doi.org/10.1002/jbmr.194>
- Sai, J., Johnson, C.H., 2002. Dark-stimulated calcium ion fluxes in the chloroplast stroma and cytosol. *Plant Cell* 14, 1279–1291. <https://doi.org/10.1105/tpc.000653>
- Saijo, Y., Sullivan, J.A., Wang, H., Yang, J., Shen, Y., Rubio, V., Ma, L., Hoecker, U., Deng, X.W., 2003. The COP1–SPA1 interaction defines a critical step in phytochrome A-mediated regulation of HY5 activity. *Genes Dev.* 17, 2642–2647. <https://doi.org/10.1101/gad.1122903.2642>
- Saito, K., 1996. Formation of L-ascorbic acid and oxalic acid from D-glucosone in *Lemna minor*. *Phytochemistry* 41, 145–149.
- Saito, S., Yamamoto-Katou, A., Yoshioka, H., Doke, N., Kawakita, K., 2006. Peroxynitrite generation and tyrosine nitration in defense responses in tobacco BY-2 cells. *Plant Cell Physiol.* 47, 689–697. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcj038>
- Sajilata, M.G., Bajaj, P.R., Singhal, R.S., 2008. Tea polyphenols as nutraceuticals. *Compr. Rev. Food Sci. and Food Saf.* 7, 229–254.
- Sakai, T., Kagawa, T., Kasahara, M., Swartz, T.E., Christie, J.M., Briggs, W.R., Wada, M., Okada, K., 2001. *Arabidopsis* nph1 and npl1: Blue light receptors that mediate both phototropism and chloroplast relocation. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 98, 6969–6974. <https://doi.org/10.1073/pnas.101137598>
- Sakanaka, S., Kim, M., Taniguchi, M., Yamamoto, T., 1989. Antibacterial substances in Japanese green tea extract against streptococcus mutans, a cariogenic bacterium. *Agric. Biol. Chem.* 53, 2307–2311. <https://doi.org/10.1080/00021369.1989.10869665>
- Sakanaka, S., Sato, T., Kim, M., Yamamoto, T., 1990. Inhibitory effects of green tea polyphenols on glucan synthesis and cellular adherence of cariogenic streptococci. *Agric. Biol. Chem.* 54, 2925–2929. <https://doi.org/10.1080/00021369.1990.10870408>
- Sakanaka, S., Shimura, N., Aizawa, M., Kim, M., Yamamoto, T., 1992. Preventive effect of green tea polyphenols against dental caries in conventional rats. *Biosci. Biotechnol. Biochem.*

56, 592–594. <https://doi.org/10.1271/bbb.56.592>

- Sakihama, Y., Cohen, M.F., Grace, S.C., Yamasaki, H., 2002. Plant phenolic antioxidant and prooxidant activities: Phenolics-induced oxidative damage mediated by metals in plants. *Toxicology* 177, 67–80. [https://doi.org/10.1016/S0300-483X\(02\)00196-8](https://doi.org/10.1016/S0300-483X(02)00196-8)
- Salah, N., Miller, N.J., Paganga, G., Tijburg, L., Bolwell, G.P., Rice-Evans, C., 1995. Polyphenolic flavanols as scavengers of aqueous phase radicals and as chain-breaking antioxidants. *Arch. Biochem. Biophys.* 322, 339–346.
- Samal, D., Kovar, J.L., Steingrobe, B., Sadana, U.S., Bhadoria, P.S., Claassen, N., 2010. Potassium uptake efficiency and dynamics in the rhizosphere of maize (*Zea mays* L.), wheat (*Triticum aestivum* L.), and sugar beet (*Beta vulgaris* L.) evaluated with a mechanistic model. *Plant Soil* 332, 105–121. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0277-6>
- Samee, W., Engkalohakul, M., Nebbua, N., Direkrojanavuti, P., Sornchaithawatwong, C., Kamkaen, N., 2006. Correlation analysis between total acid, total phenolic and ascorbic acid contents in fruit extracts and their antioxidant activities. *Thai Pharm. Heal. Sci. J.* 1, 196–203.
- Sample, E.C., Soper, R.J., Racz, G.J., 1980. Reactions of phosphate fertilizers in soils, in: *The Role of Phosphorus in Agriculture*. pp. 263–310.
- Sams, C.E., Kopsell, D., Morrow, R.C., 2016. Light quality impacts on growth, flowering, mineral uptake and petal pigmentation of marigold. *Acta Hort.* 1134, 139–145. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1134.19>
- Samuoliene, G., Brazaityte, A., Duchovskis, P., Viršile, A., Jankauskiene, J., Sirtautas, R., Novičkovas, A., Sakalauskiene, S., Sakalauskaite, J., 2012a. Cultivation of vegetable transplants using solid-state lamps for the short-wavelength supplementary lighting in greenhouses. *Acta Hort.* 952, 885–892. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.952.112>
- Samuoliene, G., Brazaityte, A., Sirtautas, R., Novičkovas, A., Duchovskis, P., 2011. Supplementary red-LED lighting affects phytochemicals and nitrate of baby leaf lettuce. *J. Food, Agric. Environ.* 9, 271–274.
- Samuoliene, Giedre, Sirtautas, R., Brazaityte, A., Duchovskis, P., 2012b. LED lighting and seasonality effects antioxidant properties of baby leaf lettuce. *Food Chem.* 134, 1494–1499. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.03.061>
- Samuoliene, G., Urbonavičiute, A., Duchovskis, P., Bliznikas, Z., Vitta, P., Zukauskas, A., 2009. Decrease in nitrate concentration in leafy vegetables under a solid-state illuminator. *HortScience* 44, 1857–1860.
- Sanad, M., Osman, M., Gharib, A., 2011. Obesity modulate serum hepcidin and treatment outcome of iron deficiency anemia in children: A case control study. *Ital. J. Pediatr.* 37, 1–6. <https://doi.org/10.1186/1824-7288-37-34>
- Sanchez-Echaniz, J., Benito-Fernandez, J., Mintegui-Raso, S., 2001. Methemoglobinemia and consumption of vegetables in infants. *Pediatrics* 107, 1024–1028. <https://doi.org/10.1542/peds.107.5.1024>
- Sánchez-Rangel, J.C., Benavides, J., Heredia, J.B., Cisneros-Zevallos, L., Jacobo-Velázquez, D.A., 2013. The Folin-Ciocalteu assay revisited: Improvement of its specificity for total phenolic content determination. *Anal. Methods* 5, 5990–5999. <https://doi.org/10.1039/c3ay41125g>
- Sánchez, M., Galisteo, M., Vera, R., Villar, I.C., Zarzuelo, A., Tamargo, J., Pé Rez-Vizcaíno, F., Duarte, J., 2006. Quercetin downregulates NADPH oxidase, increases eNOS activity and prevents endothelial dysfunction in spontaneously hypertensive rats. *J Hypertens J. Hypertens.*

- Sand, A.E., Andersson, E., Fried, G., 2002. Effects of nitric oxide donors and inhibitors of nitric oxide signalling on endothelin- and serotonin-induced contractions in human placental arteries. *Acta Physiol. Scand.* 174, 217–223. <https://doi.org/10.1046/j.1365-201x.2002.00939.x>
- Santamaria, P., Elia, A., Gonnella, M., 1997. Changes in nitrate accumulation and growth of endive plants during light period as affected by nitrogen level and form. *J. Plant Nutr.* 20 (10), 1255–1266.
- Santamaria, P., Gonnella, M., Elia, A., Parente, A., Serio, F., 2001. Ways of reducing rocket salad nitrate content. *Acta Hortic.* 548, 529–536. <https://doi.org/10.17660/Acta-Hortic.2001.548.64>
- Santner, A., Estelle, M., 2010. The ubiquitin-proteasome system regulates plant hormone signaling. *Plant J.* 61, 1029–1040. <https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2010.04112.x>
- Santos, M.S., Meydani, S.N., Leka, L., Wu, D., Fotouhi, N., Meydani, M., Hennekens, C.H., Gaziano, J.M., 1996. Natural killer cell activity in elderly men is enhanced by beta-carotene supplementation. *Am. J. Clin. Nutr.* 64, 772–777.
- Särkkä, L.E., Jokinen, K., Ottosen, C.O., Kaukoranta, T., 2017. Effects of HPS and LED lighting on cucumber leaf photosynthesis, light quality penetration and temperature in the canopy, plant morphology and yield. *Agric. Food Sci.* 26, 102–110. <https://doi.org/10.23986/af-sci.60293>
- Sasakawa, H., Yamamoto, Y., 1978. Comparison of the uptake of nitrate and ammonium by rice seedlings. *Plant Physiology* 62 (4), 665–669.
- Sasongko, P., Laohankunjit, N., Kerdchoechuen, O., 2011. *Persicaria odorata* antibacterial activity of the essential oil from *Persicaria odorata* leaves. *Agric. Sci. J.* 42, 105–108.
- Sauberlich, H.E., Hodges, R.E., Wallace, D.L., Kolder, H., Canham, J.E., Hood, J., Raica, N., Lowry, L.K., 1975. Vitamin A metabolism and requirements in the human studied with the use of labeled retinol. *Vitam. Horm.* 32, 251–275. [https://doi.org/10.1016/S0083-6729\(08\)60015-1](https://doi.org/10.1016/S0083-6729(08)60015-1)
- Savvides, A., Fanourakis, D., Van Ieperen, W., 2012. Co-ordination of hydraulic and stomatal conductances across light qualities in cucumber leaves. *J. Exp. Bot.* 63, 1135–1143. <https://doi.org/10.1093/jxb/err348>
- Sawa, T., Nakao, M., Akaike, T., Ono, K., Maeda, H., 1999. Alkylperoxyl radical-scavenging activity of various flavonoids and other phenolic compounds: Implications for the anti-tumor-promoter effect of vegetables. *J. Agric. Food Chem.* 47, 397–402. <https://doi.org/10.1021/jf980765e>
- Scaife, A., Schloemer, S., 1994. The Diurnal Pattern of Nitrate Uptake and Reduction by Spinach (*Spinacia oleracea* L.). *Ann. Bot.* <https://doi.org/10.1006/anbo.1994.1040>
- Schäfer, C., Schmid, V., 1993. Pflanzen im Lichtstreß. Überleben durch biochemische Schutz- und Reparaturmechanismen.
- Scheible, W.-R., Gonzalez-Fontes, A., Lauerer, M., Muller-Rober, B., Caboche, M., Stitt, M., 1997. Nitrate acts as a signal to induce organic acid metabolism and repress starch metabolism in tobacco. *Plant Cell* 9, 783–798. <https://doi.org/10.2307/3870432>
- Schmidhalter, U., 2005. Development of a quick on-farm test to determine nitrate levels in soil. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 168, 432–438. <https://doi.org/10.1002/jpln.200520521>
- Schmidt, E.L., 1956. Soil nitrification and nitrates in waters. *Public Health Rep.* 71, 497–503.

- Schofield, A., Paliyath, G., 2005. Modulation of carotenoid biosynthesis during tomato fruit ripening through phytochrome regulation of phytoene synthase activity. *Plant Physiol. Biochem.* 43, 1052–1060. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2005.10.006>
- Schopfer, P., Brennicke, A., 2010. *Pflanzenphysiologie*. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.
- Schravendijk, H.W., van Anel, O.M., 1985. Interdependence of growth, water relations and abscisic acid level in *Phaseolus vulgaris* during waterlogging. *Physiol. Plant.* 63, 215–220. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1985.tb01905.x>
- Schroeder, J.I., Kwak, J.M., Allen, G.J., 2001. Engineering Drought Hardiness in Plants. *Nature* 410, 327–330. <https://doi.org/10.1038/35066500>
- Schroeter, H., Heiss, C., Balzer, J., Kleinbongard, P., Keen, C.L., Hollenberg, N.K., Sies, H., Kwik-Urbe, C., Schmitz, H.H., Kelm, M., 2006. (-)-Epicatechin mediates beneficial effects of flavanol-rich cocoa on vascular function in humans. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 103, 1024–1029. <https://doi.org/10.1073/pnas.0510168103>
- Schuerger, A.C., Brown, C.S., Stryjewski, E.C., 1997. Anatomical features of pepper plants (*Capsicum annuum* L.) Grown under red light-emitting diodes supplemented with blue or far-red light. *Ann. Bot.* 79, 273–282. <https://doi.org/10.1006/anbo.1996.0341>
- Schulze, M.B., Schulz, M., Heidemann, C., Schienkiewitz, A., Hoffmann, K., Boeing, H., 2007. Fiber and magnesium intake and incidence of type 2 diabetes. *Arch. Intern. Med.* 167, 956–963. <https://doi.org/10.1001/archinte.167.9.956>
- Schumacher, P., Demarsy, E., Waridel, P., Petrolati, L.A., Trevisan, M., Fankhauser, C., 2018. A phosphorylation switch turns a positive regulator of phototropism into an inhibitor of the process. *Nat. Commun.* 9, 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04752-1>
- Schwartz, C.J., Valente, A.J., Srague, E.A., Kelley, J.L., Nerem, R.M., 1991. The pathogenesis of atherosclerosis. *Clin. Res. Cardiol.* 14, 1–14. <https://doi.org/10.1056/nejm197608122950707>
- Schwartz, S.H., Qin, X., Zeevaart, J.A.D., 2001. Characterization of a novel carotenoid cleavage dioxygenase from plants. *J. Biol. Chem.* 276, 25208–25211. <https://doi.org/10.1074/jbc.M102146200>
- Schwinn, K.E., Ngo, H., Kenel, F., Brummell, D.A., Albert, N.W., McCallum, J.A., Pither-Joyce, M., Crowhurst, R.N., Eady, C., Davies, K.M., 2016. The onion (*Allium cepa* L.) R2R3-MYB gene MYB1 regulates anthocyanin biosynthesis. *Front. Plant Sci.* 7, 1–16. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01865>
- Scolnik, P.A., Bartley, G.E., 1993. Phytoene desaturase from *Arabidopsis*. *Plant Physiol.* 103, 1475–1475. <https://doi.org/10.1104/pp.103.4.1475>
- Scott, K.J., Rodriguez-Amaya, D., 2000. Pro-vitamin A carotenoid conversion factors: Retinol equivalents - Fact or fiction? *Food Chem.* 69, 125–127. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(99\)00256-3](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(99)00256-3)
- Sellaro, R., Crepy, M., Trupkin, S.A., Karayekov, E., Buchovsky, A.S., Rossi, C., Casal, J.J., 2010. Cryptochrome as a sensor of the blue/green ratio of natural radiation in *Arabidopsis*. *Plant Physiol.* 154, 401–409. <https://doi.org/10.1104/pp.110.160820>
- Sen, A.P., Gulati, A., 2010. Use of magnesium in traumatic brain injury. *Neurotherapeutics* 7, 91–99. <https://doi.org/10.1016/j.nurt.2009.10.014>
- Senba, Y., Nishishita, T., Saito, K., Yoshioka, Hiroe, Yoshioka, Hisashi, 1999. Stopped-flow

- and spectrophotometric study on radical scavenging by tea catechins and the model compounds. *Chem. Pharm. Bull.* 47, 1369–1374.
- Seo, H.S., Watanabe, E., Tokutomi, S., Nagatani, A., Chua, N.H., 2004. Photoreceptor ubiquitination by COP1 E3 ligase desensitizes phytochrome A signaling. *Genes Dev.* 18, 617–622. <https://doi.org/10.1101/gad.1187804>
- Serafini, M., Maiani, G., Ferro-Luzzi, A., 1998. Alcohol-free red wine enhances plasma antioxidant capacity in humans. *J. Nutr.* 128, 1003–1007. <https://doi.org/10.1093/jn/128.6.1003>
- Sergeev, I.N., Arkhapchev, Y.P., Spirichev, V.B., 1990. Ascorbic acid effects on vitamin D hormone metabolism and binding in guinea pigs. *J. Nutr.* 120, 1185–1190.
- Serino, G., Pick, E., 2013. Duplication and familial promiscuity within the proteasome lid and COP9 signalosome kin complexes. *Plant Sci.* 203–204, 89–97. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2012.12.018>
- Seshadri, S., Gopaldas, T., 1989. Impact of iron supplementation on cognitive functions in pre-school and school-aged children: the Indian experience. *Am. J. Clin. Nutr.* 50, 675–686.
- Shacklock, P.S., Read, N.D., Trewavas, A.J., 1992. Cytosolic free calcium mediates red light-induced photomorphogenesis. *Nature* 358, 753–755. <https://doi.org/10.1038/358753a0>
- Shahak, Y., 2008. Photo-selective netting for improved performance of horticultural crops. A review of ornamental and vegetable studies carried out in Israel. *Acta Hortic.* 770, 161–168. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2008.770.18>
- Shahak, Y., Gussakovsky, E.E., Gal, E., Ganelevin, R., 2004. ColorNets: Crop protection and light-quality manipulation in one technology. *Acta Hortic.* 659, 143–151. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2004.659.17>
- Shalitin, D., Yang, H., Mockler, T.C., Maymon, M., Guo, H., Whitelam, G.C., Lin, C., 2002. Regulation of Arabidopsis cryptochrome 2 by blue-light-dependent phosphorylation. *Nature* 417, 763–767. <https://doi.org/10.1038/nature00815>
- Shariatpanaahi, M. V., Shariatpanaahi, Z. V., Moshtaaghi, M., Shahbaazi, S.H., Abadi, A., 2007. The relationship between depression and serum ferritin level. *Eur. J. Clin. Nutr.* 61, 532–535. <https://doi.org/10.1038/sj.ejcn.1602542>
- Sharif Zia, M., Salim, M., Aslam, M., Gill, M.A., Rahmatullah, M., 1994. Effect of low temperature of irrigation water on rice growth and nutrient uptake. *J. Agron. Crop Sci.* 173, 22–31.
- Shaul, O., 2002. Magnesium transport and function in plants: the tip of the iceberg. *BioMetals* 15, 309–323.
- Shavandi, M.A., Haddadian, Z., Halim, M., Ismail, S., 2012. *Eryngium foetidum* L. *Coriandrum sativum* and *Persicaria odorata* L.: A review. *J. Asian Sci. Res.* 2, 410–426.
- Sheahan, J.J., 1996. Sinapate esters provide greater UV-B attenuation than flavonoids in *Arabidopsis thaliana* (brassicaceae). *Am. J. Bot.* 83, 679–686. <https://doi.org/10.2307/2445845>
- Shearer, L.A., Goldsmith, J.R., Young, C., Kearns, O.A., Tamplin, B.R., 1972. Methemoglobin levels in infants in an area with high nitrate water supply. *Am. J. Public Health* 62, 1174–1180. <https://doi.org/10.2105/AJPH.62.9.1174>
- Sheerin, D.J., Menon, C., zur Oven-Krockhaus, S., Enderle, B., Zhu, L., Johnen, P., Schleifenbaum, F., Stierhof, Y.-D., Huq, E., Hiltbrunner, A., 2015. Light-Activated Phytochrome A and B Interact with Members of the SPA Family to Promote Photomorphogenesis in Arabidopsis by Reorganizing the COP1/SPA Complex. *Plant Cell Online* 27, 189–201.

<https://doi.org/10.1105/tpc.114.134775>

- Sheikh, M., Hantoushzadeh, S., Shariat, M., Farahani, Z., Ebrahimiinasab, O., 2017. The efficacy of early iron supplementation on postpartum depression, a randomized double-blind placebo-controlled trial. *Eur. J. Nutr.* 56, 901–908. <https://doi.org/10.1007/s00394-015-1140-6>
- Shen, B.-B., Yang, Y.-P., Yasamin, S., Liang, N., Su, W., Chen, S.-H., Wang, X.-J., Wang, W., 2018. Analysis of the phytochemistry and bioactivity of the genus *Polygonum* of Polygonaceae. *Digit. Chinese Med.* 1, 19–36. [https://doi.org/10.1016/s2589-3777\(19\)30005-9](https://doi.org/10.1016/s2589-3777(19)30005-9)
- Shen, J., Yuan, L., Zhang, J., Li, H., Bai, Z., Chen, X., Zhang, W., Zhang, F., 2011. Phosphorus dynamics: From soil to plant. *Plant Physiol.* 156, 997–1005. <https://doi.org/10.1104/pp.111.175232>
- Shewmaker, C.K., Sheehy, J.A., Daley, M., Colburn, S., Ke, D.Y., 1999. Seed-specific overexpression of phytoene synthase: increase in carotenoids and other metabolic effects. *Plant J.* 20, 401–412. <https://doi.org/10.1046/j.1365-313x.1999.00611.x>
- Shi, H., Wang, X., Mo, X., Tang, C., Zhong, S., Deng, X.W., 2015. Arabidopsis DET1 degrades HFR1 but stabilizes PIF1 to precisely regulate seed germination. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 112, 3817–3822. <https://doi.org/10.1073/pnas.1502405112>
- Shi, H., Zhong, S., Mo, X., Liu, N., Nezames, C.D., Deng, X.W., 2013. HFR1 sequesters PIF1 to govern the transcriptional network underlying light-initiated seed germination in Arabidopsis. *Plant Cell* 25, 3770–3784. <https://doi.org/10.1105/tpc.113.117424>
- Shi, Q.M., Yang, X., Song, L., Xue, H.W., 2011. Arabidopsis MSBP1 is activated by HY5 and HYH and is involved in photomorphogenesis and brassinosteroid sensitivity regulation. *Mol. Plant* 4, 1092–1104. <https://doi.org/10.1093/mp/ssr049>
- Shibata, A., Paganini-Hill, A., Ross, R.K., Henderson, B.E., 1992. Intake of vegetables, fruits, beta-carotene, vitamin c and vitamin supplements and cancer incidence among the elderly: A prospective study. *Br. J. Cancer* 66, 673–679. <https://doi.org/10.1038/bjc.1992.336>
- Shiga, T., Shoji, K., Shimada, H., Hashida, S., Goto, F., Yoshihara, T., 2009. Effect of light quality on rosmarinic acid content and antioxidant activity of sweet basil, *Ocimum basilicum* L. *Plant Biotechnol.* 26, 255–259. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2007.10.017>
- Shimazaki, K., Doi, M., Assmann, S.M., Kinoshita, T., 2007. Light regulation of stomatal movement. *Annu. Rev. Plant Biol.* 58, 219–247. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.57.032905.105434>
- Shin, D.H., Choi, M., Kim, K., Bang, G., Cho, M., Choi, S.B., Choi, G., Park, Y. Il, 2013. HY5 regulates anthocyanin biosynthesis by inducing the transcriptional activation of the MYB75/PAP1 transcription factor in Arabidopsis. *FEBS Lett.* 587, 1543–1547. <https://doi.org/10.1016/j.febslet.2013.03.037>
- Shin, J., Park, E., Choi, G., 2007a. PIF3 regulates anthocyanin biosynthesis in an HY5-dependent manner with both factors directly binding anthocyanin biosynthetic gene promoters in Arabidopsis. *Plant J.* 49, 981–994. <https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2006.03021.x>
- Shin, R., Burch, A.Y., Huppert, K.A., Tiwari, S.B., Murphy, A.S., Guilfoyle, T.J., Schachtman, D.P., 2007b. The Arabidopsis Transcription Factor MYB77 Modulates Auxin Signal Transduction. *Plant Cell Online* 19, 2440–2453. <https://doi.org/10.1105/tpc.107.050963>
- Shinomura, T., Nagatani, A., Chory, J., Furuya, M., 1994. The induction of seed germination in Arabidopsis thaliana is regulated principally by phytochrome B and secondarily by phytochrome A. *Plant Physiol.* 104, 363–371. <https://doi.org/10.1104/pp.104.2.363>

- Shinomura, T., Nagatani, A., Hanzawa, H., Kubota, M., Watanabe, M., Furuya, M., 1996. Action spectra for phytochrome A- and B-specific photoinduction of seed germination in *Arabidopsis thaliana*, in: Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. pp. 8129–8133. <https://doi.org/10.1073/pnas.93.15.8129>
- Shinozaki, K., Yamaguchi-Shinozaki, K., Urao, T., Koizumi, M., 1992. Nucleotide sequence of a gene from *Arabidopsis thaliana* encoding a myb homologue. *Plant Mol. Biol.* 19, 493–499.
- Shoji, K., Goto, E., Hashida, S., Goto, F., Yoshihara, T., 2011. Effect of light quality on the polyphenol content and antioxidant activity of sweet basil (*Ocimum basilicum* L.). *Acta Hort.* 907, 95–100. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2011.907.10>
- Shvarts, M., Borochoy, A., Weiss, D., 1997. Low temperature enhances petunia flower pigmentation and induced chalcone synthase gene expression. *Physiol. Plant.* 99, 67–72. <https://doi.org/10.1034/j.1399-3054.1997.990110.x>
- Sibout, R., Sukumar, P., Hettiarachchi, C., Holm, M., Muday, G.K., Hardtke, C.S., 2006. Opposite root growth phenotypes of *hy5* versus *hy5 hyh* mutants correlate with increased constitutive auxin signaling. *PLoS Genet.* 2, 1898–1911. <https://doi.org/10.1371/journal.pgen.0020202>
- Siddiqi, M.Y., Glass, A.D.M., Ruth, T.J., Fernando, M., 1989. Studies of the regulation of nitrate influx by barley seedlings using $^{13}\text{NO}_3^-$. *Plant Physiol.* 90, 806–813. <https://doi.org/10.1104/pp.90.3.806>
- Siddiqui, M.H., Al-Whaibi, M.H., Sakran, A.M., Basalah, M.O., Ali, H.M., 2012. Effect of calcium and potassium on antioxidant system of *Vicia faba* L. under cadmium stress. *Int. J. Mol. Sci.* 13, 6604–6619. <https://doi.org/10.3390/ijms13066604>
- Siefermann-Harms, D., 1985. Carotenoids in photosynthesis. I. Location in photosynthetic membranes and light-harvesting function. *Biochim. Biophys. Acta- Rev. Bioenerg.* 811, 325–355. [https://doi.org/10.1016/0304-4173\(85\)90006-0](https://doi.org/10.1016/0304-4173(85)90006-0)
- Siefermann-Harms, D., 1987. The light-harvesting and protective functions of carotenoids in photosynthetic membranes. *Physiol. Plant.* 69, 561–568. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1987.tb09240.x>
- Siener, R., Hönow, R., Seidler, A., Voss, S., Hesse, A., 2006. Oxalate contents of species of the Polygonaceae, Amaranthaceae and Chenopodiaceae families. *Food Chem.* 98, 220–224. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2005.05.059>
- Sies, H., 2010. Polyphenols and health: Update and perspectives. *Arch. Biochem. Biophys.* 501, 2–5. <https://doi.org/10.1016/j.abb.2010.04.006>
- Sies, H., 2007. Total antioxidant capacity: appraisal of a concept. *J. Nutr.* 137, 1493–1495. [https://doi.org/10.1016/s0065-2423\(03\)37010-6](https://doi.org/10.1016/s0065-2423(03)37010-6)
- Sies, H., Hollman, P.C.H., Grune, T., Stahl, W., Biesalski, H.K., Williamson, G., 2012. Protection by flavanol-rich foods against vascular dysfunction and oxidative damage. *Adv. Nutr.* 3, 217–221. <https://doi.org/10.3945/an.111.001578>
- Sies, H., Menck, C.F.M., 1992. Singlet oxygen induced DNA damage. *Mutat. Res. DNAGing* 275, 367–375. [https://doi.org/10.1016/0921-8734\(92\)90039-R](https://doi.org/10.1016/0921-8734(92)90039-R)
- Silberbush, M., Ben-Asher, J., 2001. Simulation study of nutrient uptake by plants from soilless cultures as affected by salinity buildup and transpiration. *Plant Soil* 233, 59–69. <https://doi.org/10.1023/A:1010382321883>

- Silberbush, M., Ben-Asher, J., Ephrath, J.E., 2005. A model for nutrient and water flow and their uptake by plants grown in a soilless culture. *Plant Soil* 271, 309–319. <https://doi.org/10.1007/s11104-004-3093-z>
- Simkin, A.J., Underwood, B.A., Auldrige, M., Loucas, H.M., Shibuya, K., Schmelz, E., Clark, D.G., Klee, H.J., 2004. Circadian regulation of the PhCCD1 carotenoid cleavage dioxygenase controls emission of -ionone, a fragrance volatile of petunia flowers. *Plant Physiol.* 136, 3504–3514. <https://doi.org/10.1104/pp.104.049718>
- Simkin, A.J., Zhu, C., Kuntz, M., Sandmann, G., 2003. Light-dark regulation of carotenoid biosynthesis in pepper (*Capsicum annuum*) leaves. *J. Plant Physiol.* 160, 439–443.
- Sinclair, T.R., de Wit, C.T., 1975. Photosynthate and nitrogen requirements for seed production by various crops. *Science* (80-.). 189, 565–567. <https://doi.org/10.1126/science.189.4202.565>
- Singh, K., Kumar, S., Rani, A., Gulati, A., Ahuja, P.S., 2009. Phenylalanine ammonia-lyase (PAL) and cinnamate 4-hydroxylase (C4H) and catechins (flavan-3-ols) accumulation in tea. *Funct. Integr. Genomics* 9, 125–134. <https://doi.org/10.1007/s10142-008-0092-9>
- Singleton, V.L., Orthofer, R., Lamuela-Raventós, R.M., 1999. Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of folin-ciocalteu reagent. *Methods Enzymol.* 299, 152–178.
- Sivasankar, S., Rothstein, S., Oaks, A., 1997. Regulation of the accumulation and reduction of nitrate by nitrogen and carbon metabolites in maize seedlings. *Plant Physiol.* 114, 583–589. <https://doi.org/10.1104/pp.114.2.583>
- Skaer, R.J., Peters, P.D., Emmines, J.P., 1974. The localization of calcium and phosphorus in human platelets. *J. Cell Sci.* 15, 679–692.
- Slattery, M.L., Benson, J., Curtin, K., Ma, K.N., Schaeffer, D., Potter, J.D., 2000. Carotenoids and colon cancer. *Am. J. Clin. Nutr.* 71, 575–582.
- Slavin, J., Lloyd, B., 2012. Health benefits of fruits and vegetables. *Am. Soc. Nutr. Adv. Nutr.* 3, 506–516. <https://doi.org/10.3945/an.112.002154.506>
- Smillie, R.M., Hetherington, S.E., 1999. Photoabatement by anthocyanin shields photosynthetic systems from light stress. *Photosynthetica* 36, 451–463.
- Smirnoff, N., 2011. Vitamin C, in: *FAO/WHO Expert Consultation on Human Vitamin and Mineral Requirements*. pp. 73–86. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385853-5.00003-9>
- Smirnoff, N., Wheeler, G.L., Loewus, F.A., 2000. Ascorbic acid in plants: Biosynthesis and function. *Crit. Rev. Biochem. Mol. Biol.* 35, 291–314.
- Smith, C., Mitchinson, M.J., Aruoma, O.I., Halliwell, B., 1992. Stimulation of lipid peroxidation and hydroxyl-radical generation by the contents of human atherosclerotic lesions. *Biochem. J.* 286, 901–905. <https://doi.org/10.1042/bj2860901>
- Smith, H., 1982. Light quality, photoperception, and plant strategy. *Annu. Rev. Plant Physiol.* 33, 481–518.
- Smith, H., Attridge, T.H., 1970. Increased phenylalanine ammonia-lyase activity due to light treatment and its significance for the mode of action of phytochrome. *Phytochemist* 9, 487–495.
- Smith, H., Holmes, M.G., 1977. The function of phytochrome in the natural environment - I. Characterization of daylight for studies in photomorphogenesis and photoperiodism. *Photochem. Photobiol.* 25, 533–538.
- Smith, H., Whitlam, G.C., 1997. The shade avoidance syndrome: multiple responses mediated

- by multiple phytochromes. *Plant, Cell Environ.* 20, 840–844. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.1997.d01-104.x>
- Snedden, W. a, Arazi, T., Fromm, H., Shelp, B.J., 1995. Calcium/ calmodulin activation of soybean. *Plant Physiol.* 108, 543–549.
- Snedden, W.A., Koutsia, N., Baum, G., Fromm, H., 1996. Activation of a recombinant petunia glutamate decarboxylase by calcium/calmodulin or by a monoclonal antibody which recognizes the calmodulin binding domain. *J. Biol. Chem.* 271, 4148–4153. <https://doi.org/10.1074/jbc.271.8.4148>
- Snodderly, D.M., 1995. Evidence for protection against degeneration by carotenoids and antioxidant. *Am. J. Clin. Nutr.* 62 (suppl), S1448-61.
- Sobko, T., Marcus, C., Govoni, M., Kamiya, S., 2010. Dietary nitrate in Japanese traditional foods lowers diastolic blood pressure in healthy volunteers. *Nitric Oxide - Biol. Chem.* 22, 136–140. <https://doi.org/10.1016/j.niox.2009.10.007>
- Soffers, A.E.M.F., Van Haandel, M.J.H., Boersma, M.G., Tyrakowska, B., Laane, C., Rietjens, I.M.C.M., 1999. Antioxidant activities of carotenoids: Quantitative relationships between theoretical calculations and experimental literature data. *Free Radic. Res.* 30, 233–240. <https://doi.org/10.1080/10715769900300251>
- Solovchenko, A.E., Merzlyak, M.N., 2008. Screening of visible and UV radiation as a photoprotective mechanism in plants. *Russ. J. Plant Physiol.* 55, 719–737. <https://doi.org/10.1134/S1021443708060010>
- Solti, Á., Kovács, K., Basa, B., Vértés, A., Sárvári, É., Fodor, F., 2012. Uptake and incorporation of iron in sugar beet chloroplasts. *Plant Physiol. Biochem.* 52, 91–97. <https://doi.org/10.1016/J.PLAPHY.2011.11.010>
- Somers, D.E., Devlin, P.F., Kay, S.A., 1998. Phytochromes and cryptochromes in the entrainment of the arabidopsis circadian clock. *Science (80-.)*. 282, 1488–1490.
- Somersalo, S., Krause, G.H., 1989. Photoinhibition at chilling temperature- Fluorescence characteristics of unhardened and cold-acclimated spinach leaves. *Planta* 177, 409–416. <https://doi.org/10.1007/BF00403600>
- Son, K.-H., Oh, M.-M., 2013. Leaf shape, growth, and antioxidant phenolic compounds of two lettuce cultivars grown under various combinations of blue and red light-emitting diodes. *HortScience* 48, 988–995.
- Song, S., Qi, T., Huang, H., Ren, Q., Wu, D., Chang, C., Peng, W., Liu, Y., Peng, J., Xie, D., 2011. The Jasmonate-ZIM Domain Proteins Interact with the R2R3-MYB Transcription Factors MYB21 and MYB24 to Affect Jasmonate-Regulated Stamen Development in Arabidopsis. *Plant Cell* 23, 1000–1013. <https://doi.org/10.1105/tpc.111.083089>
- Song, Y., Jiang, C., Gao, L., 2016. Polychromatic supplemental lighting from underneath canopy is more effective to enhance tomato plant development by improving leaf photosynthesis and stomatal regulation. *Front. Plant Sci.* 7, 1–14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01832>
- Sonnewald, U., 2014. Stoffwechselphysiologie, in: Strasburger Lehrbuch Der Pflanzenwissenschaften. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg, pp. 333–446. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-54435-4>
- Soo Seo, H., Yang, J.Y., Ishikawa, M., Bolle, C., Ballesteros, M.L., Chua, N.H., 2003. LAF1 ubiquitination by COP1 controls photomorphogenesis and is stimulated by SPA1. *Nature* 423, 995–999. <https://doi.org/10.1038/nature01696>
- Specker, B.L., 1996. Evidence for an interaction between calcium intake and physical activity

- on changes in bone mineral density. *J. Bone Miner. Res.* 11, 1539–1544.
- Speich, M., Bousquet, B., Nicolas, G., 1981. Reference values for ionized, complexed, and protein-bound plasma magnesium in men and women. *Clin. Chem.* 27, 246–248.
- Spiller, S., Terry, N., 1980. Limiting factors in photosynthesis. II. Iron stress diminishes photochemical capacity by reducing the number of photosynthetic units. *Plant Physiol.* 65, 121–125.
- Spínola, V., Mendes, B., Câmara, J.S., Castilho, P.C., 2013. Effect of time and temperature on vitamin C stability in horticultural extracts. UHPLC-PDA vs iodometric titration as analytical methods. *LWT - Food Sci. Technol.* 50, 489–495. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.08.020>
- Spitters, C.J. T., Toussaint, H.A.J.M., Goudriaan, J., 1986. Separating the diffuse and direct component of global radiation and its implications for modeling canopy photosynthesis Part I. Components of incoming radiation. *Agric. For. Meteorol.* 38, 217–229. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(86\)90060-2](https://doi.org/10.1016/0168-1923(86)90060-2)
- Sponga, F., Deitzer, G.F., Mancinelli, A.L., 1986. Cryptochrome, phytochrome, and the photo-regulation of anthocyanin production under blue light. *Plant Physiol.* 82, 952–955.
- Springmann, M., Mason-D'Croz, D., Robinson, S., Garnett, T., Godfray, H.C.J., Gollin, D., Rayner, M., Ballon, P., Scarborough, P., 2016. Global and regional health impacts of future food production under climate change: a modelling study. *Lancet* 387, 1937–1946.
- Spurgeon, S.L., Turner, R. V., Harding, R.W., 1979. Biosynthesis of phytoene from isopentenyl pyrophosphate by a *Neurospora* enzyme system. *Arch. Biochem. Biophys.* 195, 23–29. [https://doi.org/10.1016/0003-9861\(79\)90323-0](https://doi.org/10.1016/0003-9861(79)90323-0)
- Srivastava, Anjil Kumar, Senapati, D., Srivastava, Archana Kumari, Chakraborty, M., Gangappa, S.N., Chattopadhyay, S., 2015. SHW1 interacts with HY5 and COP1, and promotes COP1-mediated degradation of HY5 during Arabidopsis seedling development. *Plant Physiol.* 169, 2922–2934. <https://doi.org/10.1104/pp.15.01184>
- Stamler, J., Elliott, P., Dennis, B., Dyer, A.R., Kesteloot, H., Liu, K., Ueshima, H., Zhou, B.F., 2003. Intermap: background, aims, design, methods, and descriptive statistics (nondietary). *J. Hum. Hypertens.* 17, 1–40. <https://doi.org/10.1002/cncr.31084>. Talking
- Starkenmann, C., Cayeux, I., Birkbeck, A.A., 2011. Exploring natural products for new taste sensations. *Nutr. Chem. Switz.* 65, 407–410. <https://doi.org/10.2533/chimia.2011.407>
- Starkenmann, C., Luca, L., Niclass, Y., Praz, E., Roguet, D., 2006. Comparison of volatile constituents of *Persicaria odorata* (Lour.) Soják (*Polygonum odoratum* Lour.) and *Persicaria hydropiper* L. Spach (*Polygonum hydropiper* L.). *J. Agric. Food Chem.* 54, 3067–3071. <https://doi.org/10.1021/jf0531611>
- Stashenko, E.E., Martínez, J.R., Ruíz, C.A., Arias, G., Durán, C., Salgar, W., Cala, M., 2010. *Lippia origanoides* chemotype differentiation based on essential oil GC-MS and principal component analysis. *J. Sep. Sci.* 33, 93–103. <https://doi.org/10.1002/jssc.200900452>
- Steiman, S., Idol, T., Bittenbender, H.C., Gautz, L., 2011. Shade coffee in Hawai'i - Exploring some aspects of quality, growth, yield, and nutrition. *Sci. Hortic. (Amsterdam)*. 128, 152–158. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.01.011>
- Stein, A.J., 2010. Global impacts of human mineral malnutrition. *Plant Soil* 335, 133–154. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0228-2>
- Steinberg, D., Parthasarathy, S., Carew, T.E., Khoo, J.C., Witztum, J.L., 1989. Beyond cholesterol: modifications of low-density lipoprotein that increase its atherogenicity. *N. Engl. J. Med.* 320, 915–920.

- Steiner, A. A., 1980. The selective capacity of plants for ions and its importance for the composition and treatment of the nutrient solution. *Acta Horticulturae* 98, 87–97.
- Steiner, A. A., 1961. A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. *Plant and Soil* 15 (2), 134–154.
- Steingrover, E., Ratering, P., Siesling, J., 1986. Daily changes in uptake, reduction and storage of nitrate in spinach grown at low light intensity. *Physiol. Plant.* 66, 550–556.
- Stepien, P., Klobus, G., 2005. Antioxidant defense in the leaves of C3 and C4 plants under salinity stress. *Physiol. Plant.* 125, 31–40. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2005.00534.x>
- Sterns, R.H., Cox, M., Feig, P.U., Singer, I., 1981. Internal potassium balance and the control of the plasma potassium concentration. *Medicine (Baltimore)*. 60, 339–354.
- Stoitchkova, K., Busheva, M., Apostolova, E., Andreeva, A., 2006. Changes in the energy distribution in mutant thylakoid membranes of pea with modified pigment content. II. Changes due to magnesium ions concentration. *J. Photochem. Photobiol. B Biol.* 83, 11–20. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2005.11.011>
- Stoltzfus, R.M.B., Taber, H.G., Aiello, A.S., 1998. Effect of increasing root-zone temperature on growth and nutrient uptake by ‘gold star’ muskmelon plants. *J. Plant Nutr.* 21, 321–328. <https://doi.org/10.1080/01904169809365406>
- Stracke, R., Favory, J.J., Gruber, H., Bartelniewoehner, L., Bartels, S., Binkert, M., Funk, M., Weisshaar, B., Ulm, R., 2010. The Arabidopsis bZIP transcription factor HY5 regulates expression of the PFG1/MYB12 gene in response to light and ultraviolet-B radiation. *Plant, Cell Environ.* 33, 88–103. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2009.02061.x>
- Strandhagen, E., Hansson, P.O., Bosaeus, I., Isaksson, B., Eriksson, H., 2000. High fruit intake may reduce mortality among middle-aged and elderly men. The study of men born in 1913. *Eur. J. Clin. Nutr.* 54, 337–341. <https://doi.org/10.1038/sj.ejcn.1600959>
- Striegel, L., Kang, B., Pilkenton, S.J., Rychlik, M., Apostolidis, E., 2015. Effect of black tea and black tea pomace polyphenols on α -glucosidase and α -amylase inhibition, relevant to type 2 diabetes prevention. *Front. Nutr.* 2, 1–6. <https://doi.org/10.3389/fnut.2015.00003>
- Stuefer, J.F., Huber, H., 1998. Differential effects of light quantity and spectral light quality on growth, morphology and development of two stoloniferous *Potentilla* species. *Oecologia* 117, 1–8. <https://doi.org/10.1007/s004420050624>
- Sturn, A., Quackenbush, J., Trajanoski, Z., 2002. Genesis: cluster analysis of microarray data. *Bioinformatics* 18, 207–208.
- Stutte, G.W., Edney, S., Skerritt, T., 2009. Photoregulation of bioprotectant content of red leaf lettuce with light-emitting diodes. *HortScience* 44, 79–82.
- Stylinski, C.D., Gamon, J.A., Oechel, W.C., 2002. Seasonal patterns of reflectance indices, carotenoid pigments and photosynthesis of evergreen chaparral species. *Oecologia* 131, 366–374. <https://doi.org/10.1007/s00442-002-0905-9>
- Subbaiah, C.C., Bush, D.S., Sachs, M.M., 1994. Elevation of cytosolic calcium precedes anoxic gene expression in maize suspension-cultured cells. *Plant Cell* 6, 1747–1762. <https://doi.org/10.2307/3869905>
- Subbaiah, C.C., Kollipara, K.P., Sachs, M.M., 2000. A Ca^{2+} -dependent cysteine protease is associated with anoxia-induced root tip death in maize. *J. Exp. Bot.* 51, 721–730. <https://doi.org/10.1093/jxb/51.345.721>
- Sudhier, K., Kurtz, T.W., Yock, P.G., Connolly, A.J., Morris, R.C., 1993. Potassium preserves

- endothelial function and enhances aortic compliance in Dahl rats. *Hypertension* 22, 315–322. <https://doi.org/10.1161/01.HYP.22.3.315>
- Sun, J., Nishio, J.N., Vogelmann, T.C., 1998. Green light drives CO₂ fixation deep within leaves. *Plant Cell Physiol.* 39, 1020–1026.
- Sun, J., Qi, L., Li, Y., Chu, J., Li, C., 2012a. PIF4-mediated activation of YUCCA8 expression integrates temperature into the auxin pathway in regulating arabidopsis hypocotyl growth. *PLoS Genet.* 8, 1–9. <https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1002594>
- Sun, X., Kang, X., Ni, M., 2012b. Hypersensitive to red and blue 1 and its modification by protein phosphatase 7 are implicated in the control of arabidopsis stomatal aperture. *PLoS Genet.* 8, 1–14. <https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1002674>
- Sun, X., Ni, M., 2011. Hyposensitive to light, an alpha/beta fold protein, acts downstream of ELONGATED HYPOCOTYL 5 to regulate seedling de-etiolation. *Mol. Plant* 4, 116–126.
- Suntornsuk, L., Gritsanapun, W., Nilkamhank, S., Paochom, A., 2002. Quantitation of vitamin C content in herbal juice using direct titration. *J. Pharm. Biomed. Anal.* 28, 849–855. [https://doi.org/10.1016/S0731-7085\(01\)00661-6](https://doi.org/10.1016/S0731-7085(01)00661-6)
- Suwalsky, M., Orellana, P., Avello, M., Villena, F., 2007. Protective effect of Ugni molinae Turcz against oxidative damage of human erythrocytes. *Food Chem. Toxicol.* 45, 130–135. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2006.08.010>
- Suzuki, G., Yanagawa, Y., Kwok, S.F., Matsui, M., Deng, X.W., 2002. Arabidopsis COP10 is a ubiquitin-conjugating enzyme variant that acts together with COP1 and the COP9 signalosome in repressing photomorphogenesis. *Genes Dev.* 16, 554–559. <https://doi.org/10.1101/gad.964602>
- Świeca, M., 2016. Hydrogen peroxide treatment and the phenylpropanoid pathway precursors feeding improve phenolics and antioxidant capacity of quinoa sprouts via an induction of l-tyrosine and l-phenylalanine ammonia-lyases activities. *J. Chem.* 2016, 1–7. <https://doi.org/10.1155/2016/1936516>
- Sytar, O., Kumar, A., Latowski, D., Kuczynska, P., Strzałka, K., Prasad, M.N.V., 2013. Heavy metal-induced oxidative damage, defense reactions, and detoxification mechanisms in plants. *Acta Physiol. Plant.* 35, 985–999. <https://doi.org/10.1007/s11738-012-1169-6>
- Szabó, C., Ohshima, H., 1997. DNA damage induced by peroxynitrite: Subsequent biological effects. *Nitric Oxide - Biol. Chem.* 1, 373–385. <https://doi.org/10.1006/niox.1997.0143>
- Szent-Györgyi, A.G., 1975. Calcium regulation of muscle contraction. *Biophys. J.* 15, 707–723. [https://doi.org/10.1016/S0006-3495\(75\)85849-8](https://doi.org/10.1016/S0006-3495(75)85849-8)
- Tadera, K., Minami, Y., Takamatsu, K., Matsuoka, T., 2006. Inhibition of alpha-Glucosidase and alpha-Amylase by Flavonoids. *J. Nutr. Sci. Vitaminol. (Tokyo).* 52, 149–153. <https://doi.org/10.3177/jnsv.52.149>
- Takahama, U., 2004. Oxidation of vacuolar and apoplastic phenolic substrates by peroxidase: Physiological significance of the oxidation reactions. *Phytochem. Rev.* 3, 207–219. <https://doi.org/10.1023/B:PHYT.0000047805.08470.e3>
- Takahama, U., 1984. Hydrogen peroxide-dependent oxidation of flavonols by intact spinach chloroplasts. *Plant Physiol.* 74, 852–855. <https://doi.org/10.1104/pp.74.4.852>
- Takahama, U., 1983. Redox reactions between kaempferol and illuminated chloroplasts. *Plant Physiol.* 71, 598–601. <https://doi.org/10.1104/pp.71.3.598>
- Takahama, U., Oniki, T., 2017. The Association of Ascorbate and Ascorbate Oxidase in the

- Apoplast with IAA-Enhanced Elongation of Epicotyls from *Vigna angularis*. *Plant Cell Physiol.* 35, 257–266. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.pcp.a078591>
- Takahashi, A., Takeda, K., Ohnishi, T., 1991. Light-induced anthocyanin reduces the extent of damage to DNA in UV-irradiated *Centaurea cyanus* cells in culture. *Plant Cell Physiol.* 32, 541–547. [https://doi.org/10.1016/0165-1161\(92\)91606-r](https://doi.org/10.1016/0165-1161(92)91606-r)
- Takeda, E., Sakamoto, K., Yokota, K., Shinohara, M., Taketani, Y., Morita, K., Yamamoto, H., Miyamoto, K. ichi, Shibayama, M., 2002. Phosphorus supply per capita from food in Japan between 1960 and 1995. *J. Nutr. Sci. Vitaminol. (Tokyo)*. 48, 102–108. <https://doi.org/10.3177/jnsv.48.102>
- Takeda, J., 1990. Light-induced synthesis of anthocyanin in carrot cells in suspension. *J. Exp. Bot.* 41, 749–755.
- Takeda, K., Fischer, D., Grisebach, H., 1988. Anthocyanin composition of *Sinapis alba*, light induction of enzymes and biosynthesis. *Phytochemistry* 27, 1351–1353. [https://doi.org/10.1016/0031-9422\(88\)80192-4](https://doi.org/10.1016/0031-9422(88)80192-4)
- Takemiya, A., Inoue, S., Doi, M., 2005. Phototropins promote plant growth in response to blue light in low light environments. *Plant Cell ...* 17, 1120–1127. <https://doi.org/10.1105/tpc.104.030049.2>
- Talbott, L.D., Hammad, J.W., Harn, L.C., Vi, H.N., Patel, J., Zeiger, E., 2006. Reversal by green light of blue light-stimulated stomatal opening in intact, attached leaves of *Arabidopsis* operates only in the potassium-dependent, morning phase of movement. *Plant Cell Physiol.* 47, 332–339. <https://doi.org/10.1093/pcp/pci249>
- Talbott, L.D., Nikolova, G., Ortiz, A., Shmayevich, I., Zeiger, E., 2002a. Green light reversal of blue-light-stimulated stomatal opening is found in a diversity of plant species. *Am. J. Bot.* 89, 366–368. <https://doi.org/10.3732/ajb.89.2.366>
- Talbott, L.D., Zhu, J., Han, S.W., Zeiger, E., 2002b. Phytochrome and blue light-mediated stomatal opening in the orchid, *Paphiopedilum*. *Plant Cell Physiol.* 43, 639–646.
- Talon, M., Tadeo, F.R., Zeevaart, J.A.D., 1991. Cellular changes induced by exogenous and endogenous gibberellins in shoot tips of the long-day plant *Silene armeria*. *Planta* 185, 487–493. <https://doi.org/10.1007/BF00202957>
- Tamaoki, M., Mukai, F., Asai, N., Nakajima, N., Kubo, A., Aono, M., Saji, H., 2003. Light-controlled expression of a gene encoding L-galactono- γ -lactone dehydrogenase which affects ascorbate pool size in *Arabidopsis thaliana*. *Plant Sci.* 164, 1111–1117. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(03\)00122-5](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(03)00122-5)
- Tamari, G., Borochoy, A., Atzorn, R., Weiss, D., 1995. Methyl jasmonate induces pigmentation and flavonoid gene expression in *petunia* corollas: A possible role in wound response. *Physiol. Plant.* 94, 45–50.
- Tan, S.C., 1980. Phenylalanine ammonia-lyase and the phenylalanine ammonia-lyase inactivating system: effects of light, temperature and mineral deficiencies. *Funct. Plant Biol.* 7, 159–167.
- Tanada, T., 1946. Utilization of nitrates by the coffee plant under different sunlight intensities. *J. Agric. Res.* 72, 245–258.
- Tanaka, A., Tsuji, H., 1980. Effects of calcium on chlorophyll synthesis and stability in the early phase of greening in cucumber cotyledons. *Plant Physiol.* 65, 1211–1215.
- Tanaka, M., Takei, K., Kojima, M., Sakakibara, H., Mori, H., 2006. Auxin controls local cytokinin biosynthesis in the nodal stem in apical dominance. *Plant J.* 45, 1028–1036.

<https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2006.02656.x>

- Tanaka, Y., Sasaki, N., Ohmiya, A., 2008. Biosynthesis of plant pigments: Anthocyanins, betalains and carotenoids. *Plant J.* 54, 733–749. <https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2008.03447.x>
- Tang, G., 2010. Bioconversion of dietary provitamin A carotenoids to vitamin A in humans. *Am. J. Clin. Nutr.* 91, 1468–1473. <https://doi.org/10.3945/ajcn.2010.28674G>
- Tanguilig, V.C., Yambao, E.B., O'toole, J.C., De Datta, S.K., 1987. Water stress effects on leaf elongation, leaf water potential, transpiration, and nutrient uptake of rice, maize, and soybean. *Plant Soil* 103, 155–168. <https://doi.org/10.1007/BF02370385>
- Tarafdar, J.C., Jungk, A., 1987. Phosphatase activity in the rhizosphere and its relation to the depletion of soil organic phosphorus. *Biol. Fertil. Soils* 3, 199–204. <https://doi.org/10.1007/BF00640630>
- Tarakanov, I.G., 2006. Light control of growth and development in vegetable plants with various life strategies. *Acta Hortic.* 711, 315–321.
- Tardieu, F., Davies, W.J., 1992. Stomatal response to abscisic acid is a function of current plant water status. *Plant Physiol.* 98, 540–545. <https://doi.org/10.1104/pp.98.2.540>
- Tardy, F., Havaux, M., 1997. Thylakoid membrane fluidity and thermostability during the operation of the xanthophyll cycle in higher-plant chloroplasts. *Biochim. Biophys. Acta - Biomembr.* 1330, 179–193. [https://doi.org/10.1016/S0005-2736\(97\)00168-5](https://doi.org/10.1016/S0005-2736(97)00168-5)
- Tattini, M., Galardi, C., Pinelli, P., Massai, R., Remorini, D., Agati, G., 2004. Differential accumulation of flavonoids and hydroxycinnamates in leaves of *Ligustrum vulgare* under excess light and drought stress. *New Phytol.* 163, 547–561. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2004.01126.x>
- Tattini, M., Landi, M., Brunetti, C., Giordano, C., Remorini, D., Gould, K.S., Guidi, L., 2014. Epidermal coumaroyl anthocyanins protect sweet basil against excess light stress: Multiple consequences of light attenuation. *Physiol. Plant.* 152, 585–598. <https://doi.org/10.1111/ppl.12201>
- Taulavuori, K., Hyöky, V., Oksanen, J., Taulavuori, E., Julkunen-Tiitto, R., 2016. Species-specific differences in synthesis of flavonoids and phenolic acids under increasing periods of enhanced blue light. *Environ. Exp. Bot.* 121, 145–150. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2015.04.002>
- Taylor, A.O., Rowley, J.A., 1971. Plants under climatic stress. *Plant Physiol.* 47, 713–718. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1972.tb01948.x>
- Taylor, S.E., Terry, N., Huston, R.P., 1982. Limiting factors in photosynthesis. III. Effects of iron nutrition on the activities of three regulatory enzymes of photosynthetic carbon metabolism. *Plant Physiol.* 70, 1541–1543.
- Tegelberg, R., Julkunen-Tiitto, R., Aphalo, P.J., 2004. Red:far-red light ratio and UV-B radiation: their effects on leaf phenolics and growth of silver birch seedlings. *Plant, Cell Environ.* 27, 1005–1013.
- Teixeira, J., Gaspar, A., Garrido, E.M., Garrido, J., Borges, F., 2013. Hydroxycinnamic acid antioxidants: an electrochemical overview. *Biomed Res. Int.* 2013, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2013/251754>
- Tepperman, J.M., Zhu, T., Chang, H.-S., Wang, X., Quail, P.H., 2001. Multiple transcription-factor genes are early targets of phytochrome A signaling. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 98, 9437–9442. <https://doi.org/10.1073/pnas.161300998>

- Teragawa, H., Kato, M., Yamagata, T., Matsuura, H., Kajiyama, G., 2001. Magnesium causes nitric oxide independent coronary artery vasodilation in humans. *Heart* 86, 212–216.
- Terao, J., Minami, Y., Bando, N., 2011. Singlet molecular oxygen-quenching activity of carotenoids: relevance to protection of the skin from photoaging. *J. Clin. Biochem. Nutr.* 48, 57–62. <https://doi.org/10.3164/jcbrn.11>
- Terashima, I., Fujita, T., Inoue, T., Chow, W.S., Oguchi, R., 2009. Green light drives leaf photosynthesis more efficiently than red light in strong white light: Revisiting the enigmatic question of why leaves are green. *Plant Cell Physiol.* 50, 684–697. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcp034>
- Terry, N., 1980. Limiting factors in photosynthesis. I. Use of iron stress to control photochemical capacity. *Plant Physiol.* 65, 114–120. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1973.tb02086.x>
- Terry, N., Low, G., 1982. Leaf chlorophyll content and its relation to the intracellular localization of iron. *J. Plant Nutr.* 5, 301–310.
- Tesoriere, L., Ciaccio, M., Bongiorno, A., Riccio, A., Pintauro, A.M., Livrea, M.A., 1993. Antioxidant activity of all-trans-retinol in homogeneous solution and in phosphatidylcholine liposomes. *Arch. Biochem. Biophys.* 307, 217–223.
- Tewari, R.K., Kumar, P., Sharma, P.N., 2007. Oxidative stress and antioxidant responses in young leaves of mulberry plants grown under nitrogen, phosphorus or potassium deficiency. *J. Integr. Plant Biol.* 49, 313–322. <https://doi.org/10.1111/j.1672-9072.2006.00358.x>
- Thiagarajan, G., Chandani, S., Sundari, C.S., Rao, S.H., Kulkarni, A. V., Balasubramanian, D., 2001. Antioxidant properties of green and black tea, and their potential ability to retard the progression of eye lens cataract. *Exp. Eye Res.* 73, 393–401. <https://doi.org/10.1006/exer.2001.1049>
- Thomas, D.S., Montagu, K.D., Conroy, J.P., 2006. Leaf inorganic phosphorus as a potential indicator of phosphorus status, photosynthesis and growth of *Eucalyptus grandis* seedlings. *For. Ecol. Manage.* 223, 267–274. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2005.11.006>
- Thordal-Christensen, H., Zhang, Z., Wei, Y., Collinge, D.B., 1997. Subcellular localization of H₂O₂ in plants. H₂O₂ accumulation in papillae and hypersensitive response during the barley—powdery mildew interaction. *Plant J.* 11, 1187–1194. <https://doi.org/10.1046/j.1365-313X.1997.11061187.x>
- Thorington, L., 1985. Spectral, irradiance, and temporal aspects of natural and artificial light. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 453, 28–54. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1985.tb11796.x>
- Time and Date AS, 2018a. Hanoi, Vietnam — Sonnenaufgang und Sonnenuntergang September 2018 [WWW Document]. Time Date. URL <https://www.timeanddate.de/sonne/vietnam/hanoi> (accessed 9.1.18).
- Time and Date AS, 2018b. Berlin, Berlin, Deutschland — Sonnenaufgang und Sonnenuntergang September 2018 [WWW Document]. Time Date. URL <https://www.timeanddate.de/sonne/deutschland/berlin> (accessed 9.1.18).
- Todd, R.L., Swank, W.T., Douglas, J.E., Kerr, P.C., Brockway, D.L., Monk, C.D., 1975. The relationship between nitrate concentration in the southern appalachian mountain streams and terrestrial nitrifiers. *Agro-Ecosystems* 2, 127–132.
- Todorich, B., Pasquini, J.M., Garcia, C.I., Paez, P.M., Connor, J.R., 2009. Oligodendrocytes and myelination: The role of iron. *Glia* 57, 467–478. <https://doi.org/10.1002/glia.20784>
- Toh, S., McCourt, P., Tsuchiya, Y., 2012. HY5 is involved in strigolactone-dependent seed

- germination in *Arabidopsis*. *Plant Signal. Behav.* 7, 556–558. <https://doi.org/10.4161/psb.19839>
- Toledo-Ortiz, G., Huq, E., Rodríguez-Concepción, M., 2010. Direct regulation of phytoene synthase gene expression and carotenoid biosynthesis by phytochrome-interacting factors. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 107, 11626–11631. <https://doi.org/10.1073/pnas.0914428107>
- Toledo-Ortiz, G., Johansson, H., Lee, K.P., Bou-Torrent, J., Stewart, K., Steel, G., Rodríguez-Concepción, M., Halliday, K.J., 2014. The HY5-PIF regulatory module coordinates light and temperature control of photosynthetic gene transcription. *PLoS Genet.* 10, 1–14. <https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1004416>
- Tong, H., Xiao, Y., Liu, D., Gao, S., Liu, L., Yin, Y., Jin, Y., Qian, Q., Chu, C., 2014. Brassinosteroid regulates cell elongation by modulating gibberellin metabolism in rice. *Plant Cell* 26, 4376–4393. <https://doi.org/10.1105/tpc.114.132092>
- Torabian, S., Haddad, E., Rajaram, S., Banta, J., Sabaté, J., 2009. Acute effect of nut consumption on plasma total polyphenols, antioxidant capacity and lipid peroxidation. *J. Hum. Nutr. Diet.* 22, 64–71. <https://doi.org/10.1111/j.1365-277X.2008.00923.x>
- Touliatos, D., Dodd, I.C., Mcainsh, M., 2016. Vertical farming increases lettuce yield per unit area compared to conventional horizontal hydroponics. *Food Energy Secur.* 5, 184–191. <https://doi.org/10.1002/fes3.83>
- Toyomasu, T., Tsuji, H., Yamane, H., Nakayama, M., Yamaguchi, I., Murofushi, N., Takahashi, N., Inoue, Y., 1993. Light effects on endogenous levels of gibberellins in photoblastic lettuce seeds. *J. Plant Growth Regul.* 12, 85–90. <https://doi.org/10.1007/BF00193238>
- Toyomasu, T., Yamane, H., Murofushi, N., Inoue, Y., 1994. Effects of exogenously applied gibberellin and red light on the endogenous levels of abscisic acid in photoblastic lettuce seeds. *Plant Cell Physiol.* 35, 127–129.
- Tranquilli, A.L., Lucino, E., Garzetti, G.G., Romanini, C., 1994. Calcium, phosphorus and magnesium intakes correlate with bone mineral content in postmenopausal women. *Gynecol. Endocrinol.* 8, 55–58. <https://doi.org/10.3109/09513599409028459>
- Tresserra-Rimbau, A., Guasch-Ferré, M., Salas-Salvadó, J., Toledo, E., Corella, D., Castañer, O., Guo, X., Gómez-Gracia, E., Lapetra, J., Arós, F., Fiol, M., Ros, E., Serra-Majem, L., Pintó, X., Fitó, M., Babio, N., Martínez-González, M.A., Sorlí, J. V., López-Sabater, M.C., Estruch, R., Lamuela-Raventós, R.M., 2015. Intake of total polyphenols and some classes of polyphenols is inversely associated with diabetes in elderly people at high cardiovascular disease risk. *J. Nutr.* 146, 767–777. <https://doi.org/10.3945/jn.115.223610>
- Tresserra-Rimbau, A., Medina-Remón, A., Pérez-Jiménez, J., Martínez-González, M.A., Covas, M.I., Corella, D., Salas-Salvadó, J., Gómez-Gracia, E., Lapetra, J., Arós, F., Fiol, M., Ros, E., Serra-Majem, L., Pintó, X., Muñoz, M.A., Saez, G.T., Ruiz-Gutiérrez, V., Warnberg, J., Estruch, R., Lamuela-Raventós, R.M., 2013. Dietary intake and major food sources of polyphenols in a Spanish population at high cardiovascular risk: The PREDIMED study. *Nutr. Metab. Cardiovasc. Dis.* 23, 953–959. <https://doi.org/10.1016/J.NUMECD.2012.10.008>
- Tresserra-Rimbau, A., Rimm, E.B., Medina-Remón, A., Martínez-González, M.A., de la Torre, R., Corella, D., Salas-Salvadó, J., Gómez-Gracia, E., Lapetra, J., Arós, F., Fiol, M., Ros, E., Serra-Majem, L., Pintó, X., Saez, G.T., Basora, J., Sorlí, J.V., Martínez, J.A., Vinyoles, E., Ruiz-Gutiérrez, V., Estruch, R., Lamuela-Raventós, R.M., 2014. Inverse association between habitual polyphenol intake and incidence of cardiovascular events in the PREDIMED study. *Nutr. Metab. Cardiovasc. Dis.* 24, 639–647.
- Triantaphylidès, C., Havaux, M., 2009. Singlet oxygen in plants: production, detoxification and

- signaling. *Trends Plant Sci.* 14, 219–228. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2009.01.008>
- Triantaphylides, C., Krischke, M., Hoeberichts, F.A., Ksas, B., Gresser, G., Havaux, M., Van Breusegem, F., Mueller, M.J., 2008. Singlet oxygen is the major reactive oxygen species involved in photooxidative damage to plants. *Plant Physiol.* 148, 960–968. <https://doi.org/10.1104/pp.108.125690>
- Troesch, B., Hoefft, B., Mcburney, M., Eggersdorfer, M., Weber, P., 2012. Dietary surveys indicate vitamin intakes below recommendations are common in representative Western countries. *Br. J. Nutr.* 108, 692–698. <https://doi.org/10.1017/S0007114512001808>
- Tromp, J., Oele, J., 1972. Shoot growth and mineral composition of leaves and fruits of apple as affected by relative air humidity. *Physiol. Plant.* 27, 253–258. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1972.tb03610.x>
- Trouwborst, G., Schapendonk, A.H.C.M., Rappoldt, K., Pot, S., Hogewoning, S.W., van Ieperen, W., 2011. The effect of intracanopy lighting on cucumber fruit yield-Model analysis. *Sci. Hortic. (Amsterdam)*. 129, 273–278. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.03.042>
- Trudel, M.J., Ozbun, J.L., 1970. Relationship between chlorophylls and carotinoids of ripening tomato fruit as influenced by potassium nutrition. *J. Exp. Bot.* 21, 881–886.
- Tseng, T.-S., Briggs, W.R., 2010. The Arabidopsis *rcn1-1* mutation impairs dephosphorylation of phot2, resulting in enhanced blue light responses. *Plant Cell* 22, 392–402. <https://doi.org/10.1105/tpc.109.066423>
- Tsimidou, M.Z., Papoti, V.T., 2010. Bioactive Ingredients in Olive Leaves, in: *Olive Oil in Health and Disease Prevention*. Academic Press, pp. 349–356. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374420-3.00039-5>
- Tsuchiya, H., 1999. Effects of green tea catechins on membrane fluidity. *Pharmacology* 59, 34–44.
- Tsuchiya, Y., Vidaurre, D., Toh, S., Hanada, A., Nambara, E., Kamiya, Y., Yamaguchi, S., McCourt, P., 2010. A small-molecule screen identifies new functions for the plant hormone strigolactone. *Nat. Chem. Biol.* 6, 741–749. <https://doi.org/10.1038/nchembio.435>
- Tucker, K.L., Hannan, M.T., Kiel, D.P., 2001. The acid-base hypothesis: Diet and bone in the Framingham Osteoporosis Study. *Eur. J. Nutr.* 40, 231–237. <https://doi.org/10.1007/s394-001-8350-8>
- Turro, N.J., 1972. *Molekulare Photochemie*.
- Tuschil, A., Lam, C., Haslberger, A., Lindley, I., 1992. Interleukin-8 stimulates calcium transients and promotes epidermal cell proliferation. *J. Invest. Dermatol.* 99, 294–298. <https://doi.org/10.1111/1523-1747.ep12616634>
- Tussing-Humphreys, L.M., Nemeth, E., Fantuzzi, G., Freels, S., Guzman, G., Holterman, A.X.L., Braunschweig, C., 2010. Elevated systemic hepcidin and iron depletion in obese premenopausal females. *Obesity* 18, 1449–1456. <https://doi.org/10.1038/oby.2009.319>
- Tuteja, N., Singh, M.B., Misra, M.K., Bhalla, P.L., Tuteja, R., 2001. Molecular mechanisms of DNA damage and repair: Progress in plants. *Crit. Rev. Biochem. Mol. Biol.* 36, 337–397. <https://doi.org/10.1080/20014091074219>
- Uljon, S., Xu, X., Durzynska, I., Stein, S., Adelmant, G., Marto, J.A., Pear, W.S., Blacklow, S.C., 2016. Structural Basis for Substrate Selectivity of the E3 Ligase COP1. *Structure* 24, 687–696. <https://doi.org/10.1016/j.str.2016.03.002>
- Urban, O., Klem, K., Ač, A., Havránková, K., Holíšová, P., Navrátil, M., Zitová, M., Kozlová,

- K., Pokorný, R., Šprtová, M., Tomášková, I., Špunda, V., Grace, J., 2012. Impact of clear and cloudy sky conditions on the vertical distribution of photosynthetic CO₂ uptake within a spruce canopy. *Funct. Ecol.* 26, 46–55. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2011.01934.x>
- Urbonavičiūtė, A., Pinho, P., Samuolienė, G., Duchovskis, P., Vitta, P., Stonkus, A., Tamulaitis, G., Žukauskas, A., Halonen, L., 2007. Effect of short-wavelength light on lettuce growth and nutritional quality. *Sodininkystė ir daržininkystė* 26, 157–165.
- Valentão, P., Fernandes, E., Carvalho, F., Andrade, P.B., Seabra, R.M., Bastos, M. de L., 2002. Antioxidant activity of *Hypericum androsaemum* infusion: scavenging activity against superoxide radical, hydroxyl radical and hypochlorous acid. *Biol. Pharm. Bull.* 25, 1320–1323. <https://doi.org/10.1248/bpb.25.1320>
- Valiev, M., Kawai, R., Adams, J.A., Weare, J.H., 2003. The role of the putative catalytic base in the phosphoryl transfer reaction in a protein kinase: first-principles calculations. *J. Am. Chem. Soc.* 125, 9926–9927. <https://doi.org/10.1021/ja029618u>
- Valls-Pedret, C., Lamuela-Raventós, R.M., Medina-Remón, A., Quintana, M., Corella, D., Pintó, X., Martínez-González, M.Á., Estruch, R., Ros, E., 2012. Polyphenol-rich foods in the mediterranean diet are associated with better cognitive function in elderly subjects at high cardiovascular risk. *J. Alzheimer's Dis.* 29, 773–782. <https://doi.org/10.3233/JAD-2012-111799>
- Van Den Berg, R., Haenen, G.R.M.M., Van Den Berg, H., Bast, A., 1999. Applicability of an improved Trolox equivalent antioxidant capacity (TEAC) assay for evaluation of antioxidant capacity measurements of mixtures. *Food Chem.* 66, 511–517. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(99\)00089-8](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(99)00089-8)
- Van Der Vaart, H., Postma, D.S., Timens, W., Ten Hacken, N.H.T., 2004. Acute effects of cigarette smoke on inflammation and oxidative stress: A review. *Thorax* 59, 713–721. <https://doi.org/10.1136/thx.2003.012468>
- van het Hof, K.H., Brouwer, I.A., West, C.E., Haddeman, E., Steegers-Theunissen, R.P., van Dusseldorp, M., Weststrate, J.A., Eskes, T.K.A., Hautvast, J.G.A., 1999. Bioavailability of lutein from vegetables is 5 times higher than that of β -carotene. *Am. J. Clin. Nutr.* 70, 261–268.
- van Het Hof, K.H., West, C.E., Weststrate, J.A., Hautvast, J.G., 2000. Dietary factors that affect the bioavailability of carotenoids. *J. Nutr.* 130, 503–506. <https://doi.org/10.1093/jn/130.3.503>
- Van Ieperen, W., Trouwborst, G., 2008. The application of LEDs as assimilation light source in greenhouse horticulture: A simulation study. *Acta Hortic.* 801, 1407–1414. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2008.801.173>
- Van Jaarsveld, P., Faber, M., van Heerden, I., Wenhold, F., Jansen van Rensburg, W., van Averbeke, W., 2014. Nutrient content of eight African leafy vegetables and their potential contribution to dietary reference intakes. *J. Food Compos. Anal.* 33, 77–84. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2013.11.003>
- van Maanen, J.M.S., van Dijk, A., Mulder, K., de Baets, M.H., Menheere, P.C.A., van der Heide, D., Mertens, P.L.J.M., Kleinjans, J.C.S., 1994. Consumption of drinking water with high nitrate levels causes hypertrophy of the thyroid. *Toxicol. Lett.* 72, 365–374. [https://doi.org/10.1016/0378-4274\(94\)90050-7](https://doi.org/10.1016/0378-4274(94)90050-7)
- van Mierlo, L.A.J., Arends, L.R., Streppel, M.T., Zeegers, M.P.A., Kok, F.J., Grobbee, D.E., Geleijnse, J.M., 2006. Blood pressure response to calcium supplementation: A meta-analysis of randomized controlled trials. *J. Hum. Hypertens.* 20, 571–580. <https://doi.org/10.1038/sj.jhh.1002038>

- van Mierlo, L.A.J., Greyling, A., Zock, P.L., Kok, F.J., Geleijnse, J.M., 2010. Suboptimal potassium intake and potential impact on population blood pressure. *Arch. Intern. Med.* 170, 1501–1502.
- van Velzen, A.G., Sips, A.J.A.M., Schothorst, R.C., Lambers, A.C., Meulenbelt, J., 2008. The oral bioavailability of nitrate from nitrate-rich vegetables in humans. *Toxicol. Lett.* 181, 177–181. <https://doi.org/10.1016/J.TOXLET.2008.07.019>
- Vandelle, E., Delledonne, M., 2011. Peroxynitrite formation and function in plants. *Plant Sci.* 181, 534–539. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2011.05.002>
- Vandenabeele, S., Van Der Kelen, K., Dat, J., Gadjiev, I., Boonefaes, T., Morsa, S., Rottiers, P., Slooten, L., Van Montagu, M., Zabeau, M., Inze, D., Van Breusegem, F., 2003. A comprehensive analysis of hydrogen peroxide-induced gene expression in tobacco. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 100, 16113–8. <https://doi.org/10.1073/pnas.2136610100>
- Vandenabeele, S., Vanderauwera, S., Vuylsteke, M., Rombauts, S., Langebartels, C., Seidlitz, H.K., Zabeau, M., Van Montagu, M., Inzé, D., Van Breusegem, F., 2004. Catalase deficiency drastically affects gene expression induced by high light in *Arabidopsis thaliana*. *Plant J.* 39, 45–58. <https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2004.02105.x>
- Vandenbussche, F., Habricot, Y., Condiff, A.S., Maldiney, R., Van Der Straeten, D., Ahmad, M., 2007. HY5 is a point of convergence between cryptochrome and cytokinin signalling pathways in *Arabidopsis thaliana*. *Plant J.* 49, 428–441. <https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2006.02973.x>
- Vanderauwera, S., Zimmermann, P., Rombauts, S., Vandenabeele, S., Langebartels, C., Gruissem, W., Inze, D., Van Breusegem, F., 2005. Genome-wide analysis of hydrogen peroxide-regulated gene expression in *Arabidopsis* reveals a high light-induced transcriptional cluster involved in anthocyanin biosynthesis. *Plant Physiol.* 139, 806–821. <https://doi.org/10.1104/pp.105.065896>
- Vassiliev, I.R., Antonkine, M.L., Golbeck, J.H., 2001. Iron-sulfur clusters in type I reaction centers. *Biochim. Biophys. Acta - Bioenerg.* 1507, 139–160. [https://doi.org/10.1016/S0005-2728\(01\)00197-9](https://doi.org/10.1016/S0005-2728(01)00197-9)
- Vayalil, P.K., Mittal, A., Hara, Y., Elmets, C.A., Katiyar, S.K., 2004. Green tea polyphenols prevent ultraviolet light-induced oxidative damage and matrix metalloproteinases expression in mouse skin. *J. Invest. Dermatol.* 122, 1480–1487. <https://doi.org/10.1111/j.0022-202X.2004.22622.x>
- Veitch, N.C., Grayer, R.J., 2011. Flavonoids and their glycosides, including anthocyanins. *Nat. Prod. Rep.* 28, 1626–1695. <https://doi.org/10.1039/c1np00044f>
- Veneklaas, E.J., Stevens, J., Cawthray, G.R., Turner, S., Grigg, A.M., Lambers, H., 2003. Chickpea and white lupin rhizosphere carboxylates vary with soil properties and enhance phosphorus uptake. *Plant Soil* 248, 187–197. <https://doi.org/10.1023/A:1022367312851>
- Vento, R.R., D'alessandro, N.N., Giuliano, M.M., Lauricella, M.M., Carabillò, M.M., Tesoriere, G.G., 2000. Induction of apoptosis by arachidonic acid in human retinoblastoma Y79 cells: Involvement of oxidative stress. *Exp. Eye Res.* 70, 503–517. <https://doi.org/10.1006/exer.1998.0810>
- Verbruggen, N., Hermans, C., 2013. Physiological and molecular responses to magnesium nutritional imbalance in plants. *Plant Soil* 368, 87–99. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1589-0>
- Verdon, F., Burnand, B., Fallab Stubi, C.L., Bonard, C., Graff, M., Michaud, A., Bischoff, T., de Vevey, M., Studer, J.-P., Herzig, L., Chapuis, C., Tissot, J., Pécoud, A., Favrat, B., 2003.

- Iron supplementation for unexplained fatigue in non-anaemic women: double blind randomised placebo controlled trial. *BMJ* 326, 1–4. <https://doi.org/10.1136/bmj.326.7399.1124>
- Vetrella, M., Åstedt, B., Barthelmat, W., Neuvians, D., 1971. Activity of NADH- and NADPH-dependent methemoglobin reductases in erythrocytes from fetal to adult age. *Klin. Wochenschr.* 49, 972–977. <https://doi.org/10.1007/BF01489462>
- Viczián, A., Klose, C., Ádám, É., Nagy, F., 2017. New insights of red light-induced development. *Plant Cell Environ.* 40, 2457–2468. <https://doi.org/10.1111/pce.12880>
- Vidal, E.A., Araus, V., Lu, C., Parry, G., Green, P.J., Coruzzi, G.M., Gutierrez, R.A., 2010. Nitrate-responsive miR393/AFB3 regulatory module controls root system architecture in *Arabidopsis thaliana*. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 107, 4477–4482. <https://doi.org/10.1073/pnas.0909571107>
- Vinson, J., Teufel, K., Wu, N., 2001. Red wine, dealcoholized red wine, and especially grape juice, inhibit atherosclerosis in a hamster model. *Atherosclerosis* 156, 67–72.
- Virk, S.S., Cleland, R.E., 1988. Calcium and the mechanical properties of soybean hypocotyl cell walls: Possible role of calcium and protons in cell-wall loosening. *Planta* 176, 60–67. <https://doi.org/10.1007/BF00392480>
- Vishwanathan, R., Iannaccone, A., Scott, T.M., Kritchevsky, S.B., Jennings, B.J., Carboni, G., Forma, G., Satterfield, S., Harris, T., Johnson, K.C., Schalch, W., Renzi, L.M., Rosano, C., Johnson, E.J., 2014. Macular pigment optical density is related to cognitive function in older people. *Age Ageing* 43, 271–275. <https://doi.org/10.1093/ageing/aft210>
- Vivaudou, M.B., Arnoult, C., Villaz, M., 1991. Skeletal muscle ATP-sensitive K⁺ channels recorded from sarcolemmal blebs of split fibers: ATP inhibition is reduced by magnesium and ADP. *J. Membr. Biol.* 122, 165–175. <https://doi.org/10.1007/BF01872639>
- Vogelmann, T.C., Evans, J.R., 2002. Profiles of light absorption and chlorophyll within spinach leaves from chlorophyll fluorescence. *Plant, Cell Environ.* 25, 1313–1323.
- Vogelmann, T.C., Martin, G., Chen, G., Buttry, D., 1991. Fibre optic microprobes and measurement of the light microenvironment within plant tissues. *Adv. Bot. Res.* 18, 255–295. [https://doi.org/10.1016/S0065-2296\(08\)60024-5](https://doi.org/10.1016/S0065-2296(08)60024-5)
- Volk, G.M., Lynch-Holm, V.J., Kostman, T.A., Goss, L.J., Franceschi, V.R., 2002. The role of druse and raphide calcium oxalate crystals in tissue calcium regulation in *Pistia stratiotes* leaves. *Plant Biol.* 4, 34–45. <https://doi.org/10.1055/s-2002-20434>
- Von Lintig, J., Welsch, R., Bonk, M., Giuliano, G., Batschauer, A., Kleinig, H., 1997. Light-dependent regulation of carotenoid biosynthesis occurs at the level of phytoene synthase expression and is mediated by phytochrome in *Sinapis alba* and *Arabidopsis thaliana* seedlings. *Plant J.* 12, 625–634. <https://doi.org/10.1046/j.1365-313X.1997.d01-16.x>
- Vormann, J., Anke, M., 2002. Dietary magnesium: Supply, requirements and recommendations - Results from duplicate and balance studies in man. *J. Clin. Basic Cardiol.* 5, 49–53.
- Waddington, E., Puddey, I.B., Croft, K.D., 2004. Red wine polyphenolic compounds inhibit atherosclerosis in apolipoprotein E-deficient mice independently of effects on lipid peroxidation. *Am. J. Clin. Nutr.* 79, 54–61.
- Wade, H.K., Bibikova, T.N., Valentine, W.J., Jenkins, G.I., 2001. Interactions within a network of phytochrome, cryptochrome and UV-B phototransduction pathways regulate chalcone synthase gene expression in *Arabidopsis* leaf tissue. *Plant J.* 25, 675–685.
- Wagner, D., Przybyla, D., op den Camp, R., Kim, C., Landgraf, F., Lee, K.P., Wursch, M., Laloi, C., Nater, M., Hideg, E., Apel, K., 2004. The genetic basis of singlet oxygen-induced

- stress responses of *Arabidopsis thaliana*. *Science* (80-.). 306, 1183–1185. <https://doi.org/10.1126/science.1103178>
- Waldie, T., McCulloch, H., Leyser, O., 2014. Strigolactones and the control of plant development: Lessons from shoot branching. *Plant J.* 79, 607–622. <https://doi.org/10.1111/tpj.12488>
- Walker, R.B., Everette, J.D., Bryant, Q.M., Green, A.M., Abbey, Y.A., Wangila, G.W., 2010. Reactivity of various compound classes towards the Folin-Ciocalteu reagent. *AIP Conf. Proc.* 1229, 16–22.
- Walser, M., 1961. Ion association. VI. Interactions between calcium, magnesium, inorganic phosphate, citrate and protein in normal human plasma. *J. Clin. Invest.* 40, 723–730.
- Walters, M.B., Reich, P.B., 2000. Seed size, nitrogen supply, and growth rate affect tree seedling survival in deep shade. *America* (NY). 81, 1887–1901. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2000\)081\[1887:SSNSAG\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2000)081[1887:SSNSAG]2.0.CO;2)
- Wang, D., Kreutzer, D.A., Essigmann, J.M., 1998. Mutagenicity and repair of oxidative DNA damage: Insights from studies using defined lesions. *Mutat. Res. - Fundam. Mol. Mech. Mutagen.* 400, 99–115. [https://doi.org/10.1016/S0027-5107\(98\)00066-9](https://doi.org/10.1016/S0027-5107(98)00066-9)
- Wang, F.F., Lian, H.L., Kang, C.Y., Yang, H.Q., 2010. Phytochrome B is involved in mediating red light-induced stomatal opening in *Arabidopsis thaliana*. *Mol. Plant* 3, 246–259. <https://doi.org/10.1093/mp/ssp097>
- Wang, H., Ma, L.-G., Li, J.-M., Zhao, H.-Y., Wang Deng, X., 2001. Direct interaction of *Arabidopsis* cryptochromes with COP1 in light control development. *Science* (80-.). 294, 154–158.
- Wang, J., Constabel, C.P., 2004. Polyphenol oxidase overexpression in transgenic *Populus* enhances resistance to herbivory by forest tent caterpillar (*Malacosoma disstria*). *Planta* 220, 87–96. <https://doi.org/10.1007/s00425-004-1327-1>
- Wang, J., Ho, L., Zhao, W., Ono, K., Rosensweig, C., Chen, L., Humala, N., Teplow, D.B., Pasinetti, G.M., 2008. Grape-derived polyphenolics prevent a oligomerization and attenuate cognitive deterioration in a mouse model of alzheimer's disease. *J. Neurosci.* 28, 6388–6392. <https://doi.org/10.1523/jneurosci.0364-08.2008>
- Wang, J., Yu, Y., Zhang, Z., Quan, R., Zhang, H., Ma, L., Deng, X.W., Huang, R., 2013a. *Arabidopsis* CSN5B interacts with VTC1 and modulates ascorbic acid synthesis. *Plant Cell* 25, 625–636. <https://doi.org/10.1105/tpc.112.106880>
- Wang, J., Zhang, Z., Huang, R., 2013b. Regulation of ascorbic acid synthesis in plants. *Plant Signal. Behav.* 8, 1–3. <https://doi.org/10.4161/psb.24536>
- Wang, M., Zheng, Q., Shen, Q., Guo, S., 2013c. The critical role of potassium in plant stress response. *Int. J. Mol. Sci.* 14, 7370–7390. <https://doi.org/10.3390/ijms14047370>
- Wang, W., Bourgeois, T., Klima, J., Berlan, E.D., Fischer, A.N., O'Brien, S.H., 2013d. Iron deficiency and fatigue in adolescent females with heavy menstrual bleeding. *Haemophilia* 19, 225–230. <https://doi.org/10.1111/hae.12046>
- Wang, X., Li, W., Piqueras, R., Cao, K., Deng, X.W., Wei, N., 2009. Regulation of COP1 nuclear localization by the COP9 signalosome via direct interaction with CSN1. *Plant J.* 58, 655–667. <https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2009.03805.x>
- Wang, X., Ouyang, Y., Liu, J., Zhu, M., Zhao, G., Bao, W., Hu, F.B., 2014. Fruit and vegetable consumption and mortality from all causes, cardiovascular disease, and cancer: Systematic review and dose-response meta-analysis of prospective cohort studies. *BMJ* 349, 1–14. <https://doi.org/10.1136/bmj.g4490>

- Wang, Y., Folta, K.M., 2013. Contributions of green light to plant growth and development. *Am. J. Bot.* 100, 70–78. <https://doi.org/10.3732/ajb.1200354>
- Wang, Y., Kim, H.J., Sparrow, J.R., 2017. Quercetin and cyanidin-3-glucoside protect against photooxidation and photodegradation of A2E in retinal pigment epithelial cells. *Exp. Eye Res.* 160, 45–55. <https://doi.org/10.1002/cncr.27633>.Percutaneous
- Wang, Y., Zhang, T., Folta, K.M., 2015. Green light augments far-red-light-induced shade response. *Plant Growth Regul.* 77, 147–155. <https://doi.org/10.1007/s10725-015-0046-x>
- Wanlai, Z., Wenke, L., Qichang, Y., 2013. Reducing nitrate content in lettuce by pre-harvest continuous light delivered by red and blue light-emitting diodes content in lettuce by pre-harvest continuous light delivered by red. *J. Plant Nutr.* 36, 481–490. <https://doi.org/10.1080/01904167.2012.748069>
- Ward, D., Spiegel, M., Saltz, D., 1997. Gazelle herbivory and interpopulation differences in calcium oxalate content of leaves of a desert lily. *J. Chem. Ecol.* 23, 333–346. <https://doi.org/10.1023/B:JOEC.0000006363.34360.9d>
- Wark, P.A., Lau, R., Norat, T., Kampman, E., 2012. Magnesium intake and colorectal tumor risk: A case-control study and meta-analysis. *Am. J. Clin. Nutr.* 96, 622–631. <https://doi.org/10.3945/ajcn.111.030924>
- Warren, J.C., Carr, D.O., Grisolia, S., 1964. Effect of cofactors, oestrogens and magnesium ions on the activity and stability of human glutamate dehydrogenase. *Biochem. J.* 93, 409–419. <https://doi.org/10.1042/bj0930409>
- Watson, R.R., Prabhala, R.H., Plezia, P.M., Alberts, D.S., 1991. Effect of beta-carotene on lymphocyte subpopulations in elderly humans: evidence for a dose-response relationship. *Am. J. Clin. Nutr.* 53, 90–94.
- Wattanathorn, J., Thiraphatthanavong, P., Thukham-Mee, W., Muchimapura, S., Wannanond, P., Tong-Un, T., 2017. Anticataractogenesis and antiretinopathy effects of the novel protective agent containing the combined extract of mango and vietnamese coriander in STZ-diabetic rats. *Oxid. Med. Cell. Longev.* 2017, 1–13. <https://doi.org/10.1155/2017/5290161>
- Watts, K.T., Mijts, B.N., Lee, P.C., Manning, A.J., Schmidt-Dannert, C., 2006. Discovery of a Substrate Selectivity Switch in Tyrosine Ammonia-Lyase, a Member of the Aromatic Amino Acid Lyase Family. *Chem. Biol.* 13, 1317–1326. <https://doi.org/10.1016/j.chembiol.2006.10.008>
- Wayne Kielley, W., 1955. Mg-Activated muscle ATPases: $\text{ATP} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{ADP} + \text{Pi}$. *Methods Enzymol.* 2, 588–591. [https://doi.org/10.1016/S0076-6879\(55\)02259-3](https://doi.org/10.1016/S0076-6879(55)02259-3)
- Weatherwax, S.C., Ong, M.S., Degenhardt, J., Bray, E.A., Tobin, E.M., 1996. The interaction of light and abscisic acid in the regulation of plant gene expression. *Plant Physiol.* 111, 363–370.
- Webb, A., Hetherington, A.M., 1997. Convergence of the abscisic acid, CO_2 , and extracellular calcium signal transduction pathways in stomatal guard cells. *Plant Physiol.* 114, 1557–1560. <https://doi.org/10.1104/pp.114.4.1557>
- Weber, D., Grune, T., 2012. The contribution of β -carotene to vitamin A supply of humans. *Mol. Nutr. Food Res.* 56, 251–258. <https://doi.org/10.1002/mnfr.201100230>
- Wei, N., Deng, X.-W., 1992. COP9: A new genetic locus involved in light-regulated development and gene expression in Arabidopsis. *Plant Cell* 4, 1507–1518.
- Wei, S., Li, X., Gruber, M.Y., Feyissa, B.A., Amyot, L., Hannoufa, A., 2018. COP9 signalosome subunit 5A affects phenylpropanoid metabolism, trichome formation and transcription

- of key genes of a regulatory tri-protein complex in Arabidopsis. *BMC Plant Biol.* 18, 1–13. <https://doi.org/10.1186/s12870-018-1347-9>
- Weimann, Hermann, 1999. Studies on wound healing: effects of calcium D-pantothenate on the migration, proliferation and protein synthesis of human dermal fibroblasts in culture. *Int. J. Vitam. Nutr. Res.* 69, 113–119.
- Welch, A.A., Fransen, H., Jenab, M., Boutron-Ruault, M.C., Tumino, R., Agnoli, C., Ericson, U., Johansson, I., Ferrari, P., Engeset, D., Lund, E., Lentjes, M., Key, T., Touvier, M., Nivavong, M., Larrañaga, N., Rodríguez, L., Ocké, M.C., Peeters, P.H.M., Tjønneland, A., Bjerregaard, L., Vasilopoulou, E., Dilis, V., Linseisen, J., Nöthlings, U., Riboli, E., Slimani, N., Bingham, S., 2009. Variation in intakes of calcium, phosphorus, magnesium, iron and potassium in 10 countries in the european prospective investigation into cancer and nutrition study. *Eur. J. Clin. Nutr.* 63, S101–S121. <https://doi.org/10.1038/ejcn.2009.77>
- Wellmann, E., Hrazdina, G., Grisebach, H., 1976. Induction of anthocyanin formation and of enzymes related to its biosynthesis by UV light in cell cultures of *Haplopappus gracilis*. *Phytochemistry* 15, 913–915. [https://doi.org/10.1016/S0031-9422\(00\)84369-1](https://doi.org/10.1016/S0031-9422(00)84369-1)
- Welsch, R., Beyer, P., Hugueney, P., Kleinig, H., Von Lintig, J., 2000. Regulation and activation of phytoene synthase, a key enzyme in carotenoid biosynthesis, during photomorphogenesis. *Planta* 211, 846–854. <https://doi.org/10.1007/s004250000352>
- Welten, D., Kemper, H., Post, G., Van Staveren, W., 1996. A meta-analysis of the effect of calcium intake on bone mass in young and middle-aged females and males. *Osteoporos. Int.* 125, 2802–2813. <https://doi.org/10.1007/bf02499982>
- Wen, J., Bao, S., Yang, Q., Cui, H., 2009. Influence of R/B ratio in LED lighting on physiology and quality of lettuce. *Chinese J. Agrometeorol.* 3, 413–416.
- Wetselaar, R., 1961. Nitrate distribution in tropical soils II. Extent of capillary accumulation of nitrate during a long dry period. *Plant Soil* 15, 121–133.
- WetterKontor, 2018. Wetterrückblick Berlin/Dahlem [WWW Document]. URL <https://www.wetterkontor.de/de/wetter/deutschland/rueckblick.asp?id=20&datum=09.06.2014&t=4>
- Wheeler, G.L., Jones, M.A., Smirnoff, N., 1998. The biosynthetic pathway of vitamin C in higher plants. *Nature* 393, 365–369.
- Whitelam, G.C., Johnson, C.B., 1982. Photomorphogenesis in *Impatiens parviflora* and other plant species under simulated natural canopy radiations. *New Phytol.* 90, 611–618.
- Whitelam, G.C., Johnson, E., Peng, J., Carol, P., Anderson, M.L., Cowl, J.S., Harberd, Nicholas, P., 1993. Phytochrome A null mutants of Arabidopsis display a wild-type phenotype in white light. *Plant Cell* 5, 757–768. <https://doi.org/10.1105/tpc.5.7.757>
- WHO, 2012. Guideline: Potassium intake for adults and children. *World Heal. Organ.* 1–20.
- Widdowson, E.M., McCance, E.A., Spray, C.M., 1951. The chemical composition of the human body. *Clin. Sci.* 10, 113–125.
- Wientjes, E., Van Amerongen, H., Croce, R., 2013. LHCII is an antenna of both photosystems after long-term acclimation. *Biochim. Biophys. Acta - Bioenerg.* 1827, 420–426. <https://doi.org/10.1016/j.bbabi.2012.12.009>
- Wild, A., Wolf, G., 1980. The effect of different light intensities on the frequency and size of stomata, the size of cells, the number, size and chlorophyll content of chloroplasts in the mesophyll and the guard cells during the ontogeny of primary leaves of *Sinapis alba*. *Zeitschrift für Pflanzenphysiologie* 97, 325–342. [https://doi.org/10.1016/S0044-328X\(80\)80006-7](https://doi.org/10.1016/S0044-328X(80)80006-7)

- Wiley, K.E., Davenport, A.P., 2001. Nitric oxide-mediated modulation of the endothelin-1 signalling pathway in the human cardiovascular system. *Br. J. Pharmacol.* 132, 213–220. <https://doi.org/10.1038/sj.bjp.0703834>
- Williams, R.F., 1948. The effects of phosphorus supply on the rates of intake of phosphorus and nitrogen and upon certain aspects of phosphorus metabolism in gramineous plants. *Aust. J. Biol. Sci.* 1, 333–361. <https://doi.org/10.1071/B19480333>
- Williamson, G., 2013. Possible effects of dietary polyphenols on sugar absorption and digestion. *Mol. Nutr. Food Res.* 57, 48–57. <https://doi.org/10.1002/mnfr.201200511>
- Williamson, G., Holst, B., 2008. Dietary reference intake (DRI) value for dietary polyphenols: Are we heading in the right direction? *Br. J. Nutr.* 99, 55–58. <https://doi.org/10.1017/S0007114508006867>
- Williamson, J.R., Cooper, R.H., Hoek, J.B., 1981. Role of calcium in the hormonal regulation of liver metabolism. *Biochim. Biophys. Acta* 639, 243–295.
- Willis, L.M., Shukitt-Hale, B., Cheng, V., Joseph, J.A., 2009. Dose-dependent effects of walnuts on motor and cognitive function in aged rats. *Br. J. Nutr.* 101, 1140–1144. <https://doi.org/10.1017/S0007114508059369>
- Wilson, J.R., Hill, K., Cameron, D.M., Shelton, H.M., 1990. The growth of *Paspalum notatum* under the shade of a *Eucalyptus grandis* plantation canopy or in full sun. *Trop. Grasslands* 24, 24–28.
- Wilson, S.B., Rajapakse, N.C., 2001. Use of photoselective plastic films to control growth of three perennial salvias. *J. Appl. Hortic.* 3, 71–74.
- Wold, S., Esbensen, K., Geladi, P., 1987. Principal component analysis. *Chemom. Intell. Lab. Syst.* 2, 37–52.
- Wolters, M.G.E., Diepenmaat, H.B., Hermius, R.J.J., Voragen, A.G.J., 1993. Relation between in vitro availability of minerals and food composition: a mathematical model. *J. Food Sci.* 58, 1349–1355. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1993.tb06181.x>
- Wong, C.C., 1990. Mineral composition and nutritive value of tropical forage legumes as affected by shade. *Mardi Res. Bull.* 18, 135–143.
- Woodall, A.A., Lee, S.W.M., Weesie, R.J., Jackson, M.J., Britton, G., 1997. Oxidation of carotenoids by free radicals: Relationship between structure and reactivity. *Biochim. Biophys. Acta* 1336, 33–42. [https://doi.org/10.1016/S0304-4165\(97\)00006-8](https://doi.org/10.1016/S0304-4165(97)00006-8)
- Woodall, G., Stewart, G.R., 1998. Do anthocyanins play a role in UV protection of the red juvenile leaves of *Syzygium*? *J. Exp. Bot.* 49, 1447–1450. <https://doi.org/10.1093/jexbot/49.325.1447>
- Woraratphoka, J., Intarapichet, K.-O., Indrapichate, K., 2012. Antioxidant activity and cytotoxicity of six selected, regional, Thai vegetables. *Am. J. Toxicol. Sci.* 4, 108–117. <https://doi.org/10.5829/idosi.ajejts.2012.4.2.641>
- Wright, W.D., 1963. “The Rays are not coloured.” *Nature* 198, 1239–1244. <https://doi.org/10.1038/1981239a0>
- Wu, K., Erdman, J.W., Schwartz, S.J., Platz, E. a, Leitzmann, M., Clinton, S.K., DeGroff, V., Willett, W.C., Giovannucci, E., 2004. Plasma and dietary carotenoids, and the risk of prostate cancer. *Cancer Epidemiol. Biomarkers Prev.* 13, 260–269. <https://doi.org/10.1158/1055-9965.epi-03-0012>
- Xia, Y., Zweier, J.L., 1997. Superoxide and peroxynitrite generation from inducible nitric oxide

- synthase in macrophages. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 94, 6954–6958.
- Xia, Z., Dudek, H., Miranti, C.K., Greenberg, M.E., 1996. Calcium influx via the NMDA receptor induces immediate early gene transcription by a MAP kinase/ERK-dependent mechanism. *J. Neurosci.* 16, 5425–5436. <https://doi.org/10.1523/jneurosci.16-17-05425.1996>
- Xiao, J., Zhao, Y., Wang, H., Yuan, Y., Yang, F., Zhang, C., Kai, G., 2011. Non-covalent interaction of dietary polyphenols with total plasma proteins of type II diabetes: Molecular structure/property-affinity relationships. *Integr. Biol.* 3, 1087–1094. <https://doi.org/10.1039/c1ib00076d>
- XiaoYing, L., ShiRong, G., ZhiGang, X., XueLei, J., Tezuka, T., 2011. Regulation of chloroplast ultrastructure, cross-section anatomy of leaves, and morphology of stomata of cherry tomato by different light irradiations of light-emitting diodes. *HortScience* 46, 217–221.
- Xiloyannis, C., Celano, G., Montanaro, G., Dichio, B., Sebastiani, L., Minnocci, A., 2001. Water relations, calcium and potassium concentration in fruits and leaves during annual growth in mature kiwifruit plants. *Acta Hortic.* 564, 129–134. <https://doi.org/10.17660/Acta-Hortic.2001.564.14>
- Xu, H.X., Weng, X.Y., Yang, Y., 2007. Effect of phosphorus deficiency on the photosynthetic characteristics of rice plants. *Russ. J. Plant Physiol.* 54, 741–748. <https://doi.org/10.1134/s1021443707060040>
- Xu, X., Paik, I., Zhu, L., Bu, Q., Huang, X., Deng, X.W., Huq, E., 2014. PHYTOCHROME INTERACTING FACTOR1 Enhances the E3 Ligase Activity of CONSTITUTIVE PHOTOMORPHOGENIC1 to Synergistically Repress Photomorphogenesis in Arabidopsis. *Plant Cell* 26, 1992–2006. <https://doi.org/10.1105/tpc.114.125591>
- Xu, Y.L., Gage, D.A., Zeevaart, J.A.D., 1997. Gibberellins and stem growth in Arabidopsis thaliana: Effects of photoperiod on expression of the GA4 and GA5 loci. *Plant Physiol.* 114, 1471–1476. <https://doi.org/10.1104/pp.114.4.1471>
- Yabuta, Y., Mieda, T., Rapolu, M., Nakamura, A., Motoki, T., Maruta, T., Yoshimura, K., Ishikawa, T., Shigeoka, S., 2007. Light regulation of ascorbate biosynthesis is dependent on the photosynthetic electron transport chain but independent of sugars in Arabidopsis. *J. Exp. Bot.* 58, 2661–2671. <https://doi.org/10.1093/jxb/erm124>
- Yamanaka-Okada, A., Sato, E., Kouchi, T., Kimizuka, R., Kato, T., Okuda, K., 2008. Inhibitory effect of cranberry polyphenol on cariogenic bacteria. *Bull. Tokyo Dent. Coll.* 49, 107–112. <https://doi.org/10.2209/tdcpublishation.49.107>
- Yamori, W., Noguchi, K., Terashima, I., 2005. Temperature acclimation of photosynthesis in spinach leaves: Analyses of photosynthetic components and temperature dependencies of photosynthetic partial reactions. *Plant, Cell Environ.* 28, 536–547. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2004.01299.x>
- Yan, N., Xu, X.F., Wang, Z.D., Huang, J.Z., Guo, D.P., 2013. Interactive effects of temperature and light intensity on photosynthesis and antioxidant enzyme activity in *Zizania latifolia* Turcz. plants. *Photosynthetica* 51, 127–138. <https://doi.org/10.1007/s11099-013-0009-2>
- Yan, W., Jang, G.F., Haeseleer, F., Esumi, N., Chang, J., Kerrigan, M., Campochiaro, M., Campochiaro, P., Palczewski, K., Zack, D.J., 2001. Cloning and characterization of a human β,β -carotene-15, 15'-dioxygenase that is highly expressed in the retinal pigment epithelium. *Genomics* 72, 193–202. <https://doi.org/10.1006/geno.2000.6476>
- Yanagawa, Y., Sullivan, J.A., Komatsu, S., Gusmaroli, G., Suzuki, G., Yin, J., Ishibashi, T., Saijo, Y., Rubio, V., Kimura, S., Wang, J., Deng, X.W., 2004. Arabidopsis COP10 forms a complex with DDB1 and DET1 in vivo and enhances the activity of ubiquitin conjugating

- enzymes. *Genes Dev.* 18, 2172–2181. <https://doi.org/10.1101/gad.1229504>
- Yanagida, A., Kanda, T., Tanabe, M., Matsudaira, F., Cordeiro, J.G.O., 2000. Inhibitory effects of apple polyphenols and related compounds on cariogenic factors of mutans streptococci. *J. Agric. Food Chem.* 48, 5666–5671. <https://doi.org/10.1021/jf000363i>
- Yanagisawa, S., 2014. Transcription factors involved in controlling the expression of nitrate reductase genes in higher plants. *Plant Sci.* 229, 167–171. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2014.09.006>
- Yang, G.H., Yang, L.T., Jiang, H.X., Li, Y., Wang, P., Chen, L.S., 2012. Physiological impacts of magnesium-deficiency in Citrus seedlings: Photosynthesis, antioxidant system and carbohydrates. *Trees - Struct. Funct.* 26, 1237–1250. <https://doi.org/10.1007/s00468-012-0699-2>
- Yang, G.Y., Liao, J., Kim, K., Yurkow, E.J., Yang, C.S., 1998. Inhibition of growth and induction of apoptosis in human cancer cell lines by tea polyphenols. *Carcinogenesis* 19, 611–616. <https://doi.org/10.1093/carcin/19.4.611>
- Yang, H.-Q., Tang, R.-H., Cashmore, A.R., 2001. The signaling mechanism of Arabidopsis CRY1 involves direct interaction with COP1. *Plant Cell* 13, 2573–2587. <https://doi.org/10.2307/3871520>
- Yang, Q., 2011. Sodium and potassium intake and mortality among US adults. *Arch. Intern. Med.* 171, 1183–1191. <https://doi.org/10.1001/archinternmed.2011.257>
- Yang, R.-Y., Lin, S., Kuo, G., 2008. Content and distribution of flavonoids among 91 edible plant species. *Asia Pac. J. Clin. Nutr.* 17, 275–279.
- Yang, R.Y., Wu, J., Chen, D., Lin, M., Shiao, R., Kuo, G., 2007a. Distribution of edible plants for nutraceutical values. *Acta Hort.* 752, 115–122. <https://doi.org/10.17660/Acta-Hortic.2007.752.15>
- Yang, S.-W., Lee, B.R., Koh, J.-W., 2007b. Protective effects of epigallocatechin gallate after UV irradiation of cultured human retinal pigment epithelial cells. *Korean J. Ophthalmol.* 21, 232–237. <https://doi.org/10.3341/kjo.2008.22.3.183>
- Yano, S., Terashima, I., 2001. Separate localization of light signal perception for sun or shade type chloroplast and palisade tissue differentiation in *Chenopodium album*. *Plant Cell Physiol.* 42, 1303–1310. <https://doi.org/10.1093/pcp/pce183>
- Yazaki, Y., Asukagawa, N., Ishikawa, Y., Ohta, E., Sakata, M., 1988. Estimation of cytoplasmic free Mg^{2+} levels and phosphorylation potentials in mung bean root tips by in vivo ^{31}P NMR spectroscopy. *Plant Cell Physiol.* 29, 919–924. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.pcp.a077596>
- Yeh, K.-C., Lagarias, J.C., 1998. Eukaryotic phytochromes: Light-regulated serine/threonine protein kinases with histidine kinase ancestry. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 95, 13976–13981. <https://doi.org/10.1073/pnas.95.23.13976>
- Yeh, N., Chung, J.P., 2009. High-brightness LEDs-Energy efficient lighting sources and their potential in indoor plant cultivation. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 13, 2175–2180. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.01.027>
- Yeung, K.Y., Ruzzo, W.L., 2001. Principal component analysis for clustering gene expression data. *Bioinformatics* 17, 763–774. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/17.9.763>
- Yi, C., Deng, X.W., 2005. COP1 - From plant photomorphogenesis to mammalian tumorigenesis. *Trends Cell Biol.* 15, 618–625. <https://doi.org/10.1016/j.tcb.2005.09.007>

- Yin, S., Ze, Y., Liu, C., Li, N., Zhou, M., Duan, Y., Hong, F., 2009. Cerium relieves the inhibition of nitrogen metabolism of spinach caused by magnesium deficiency. *Biol. Trace Elem. Res.* 132, 247–258. <https://doi.org/10.1007/s12011-009-8392-z>
- Yokoi, K., Konomi, A., 2017. Iron deficiency without anaemia is a potential cause of fatigue: Meta-analyses of randomised controlled trials and cross-sectional studies. *Br. J. Nutr.* 117, 1422–1431. <https://doi.org/10.1017/S0007114517001349>
- Yokozawa, T., Nakagawa, T., Kitani, K., 2002. Antioxidative activity of green tea polyphenol in cholesterol-fed rats. *J. Agric. Food Chem.* 50, 3549–3552. <https://doi.org/10.1021/jf020029h>
- Yong, L.-C., Forman, M.R., Beecher, G.R., Graubard, B.I., Campbell, W.S., Reichman, M.E., Taylor, P.R., Lanza, E., Holden, J.M., Judd, J.T., 1994. Relationship between dietary intake and plasma concentrations in premenopausal women: application of the USDA-NCI carotenoid food-composition database. *Am. J. Clin. Nutr.* 60, 223–230.
- Yoo, C.Y., Pasoreck, E.K., Wang, H., Cao, J., Blaha, G.M., Weigel, D., Chen, M., 2019. Phytochrome activates the plastid-encoded RNA polymerase for chloroplast biogenesis via nucleus-to-plastid signaling. *Nat. Commun.* 10, 2629. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-10518-0>
- Yordanova, R.Y., Christov, K.N., Popova, L.P., 2004. Antioxidative enzymes in barley plants subjected to soil flooding. *Environ. Exp. Bot.* 51, 93–101. [https://doi.org/10.1016/S0098-8472\(03\)00063-7](https://doi.org/10.1016/S0098-8472(03)00063-7)
- Yorio, N.C., Goins, G.D., Kagle, H.R., Wheeler, R.M., Sager, J.C., 2001. Improving spinach, radish, and lettuce growth under red light-emitting diodes (leds) with blue light supplementation. *HortScience* 36, 380–383.
- Youdim, M.B., Yehuda, S., 2000. The neurochemical basis of cognitive deficits induced by brain iron deficiency: involvement of dopamine-opiate system. *Cell. Mol. Biol.* 46, 491–500.
- Young, D.R., Smith, W.K., 1983. Effect of cloudcover on photosynthesis and transpiration in the subalpine understory species *Arnica latifolia*. *Ecology* 64, 681–687.
- Yu, J.W., Rubio, V., Lee, N.Y., Bai, S., Lee, S.Y., Kim, S.S., Liu, L., Zhang, Yiyue, Irigoyen, M.L., Sullivan, J.A., Zhang, Yu, Lee, I., Xie, Q., Paek, N.C., Deng, X.W., 2008. COP1 and ELF3 control circadian function and photoperiodic flowering by regulating GI stability. *Mol. Cell* 32, 617–630. <https://doi.org/10.1016/j.molcel.2008.09.026>
- Yuncong, Y., Shaohui, W., Yun, K., 2007. Characteristics of photosynthesis machinism in different peach species under low light intensity. *Sci. Agric. Sin.* 40, 855–863.
- Zang, M., Xu, S., Maitland-Toolan, K.A., Zuccollo, A., Hou, X., Jiang, B., Wierzbicki, M., Verbeuren, T.J., Cohen, R.A., 2006. Polyphenols stimulate AMP-activated protein kinase, lower lipids, and inhibit accelerated atherosclerosis in diabetic LDL receptor-deficient mice. *Diabetes* 55, 2180–2191. <https://doi.org/10.2337/db05-1188>
- Zeeshan, H.M.A., Lee, G.H., Kim, H.R., Chae, H.J., 2016. Endoplasmic reticulum stress and associated ROS. *Int. J. Mol. Sci.* 17, 1–20. <https://doi.org/10.3390/ijms17030327>
- Zemel, M.B., Shi, H., 2000. Brief Critical Reviews. *Nutrition* 58, 177–180. <https://doi.org/10.1301/nr.2003.dec.423>
- Zhai, X., Ashraf, M., 1995. Direct detection and quantification of singlet oxygen during ischemia and reperfusion in rat hearts. *Am. J. Physiol. Circ. Physiol.* 269, 1229–1236. <https://doi.org/10.1152/ajpheart.1996.271.4.h1720>
- Zhang, D., Hendricks, D.G., Mahoney, A.W., Cornforth, D.P., 1985. Bioavailability of iron in

- green peas, spinach, bran cereal, and cornmeal fed to anemic rats. *J. Food Sci.* 50, 426–428. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1985.tb13418.x>
- Zhang, H.-N., Wei-Cai, L., Wang, H.-C., Shi, S.-Y., Shu, B., Liu, L.-Q., Wei, Y.-Z., Xie, J.-H., 2016. Transcriptome profiling of light-regulated anthocyanin biosynthesis in the pericarp of litchi. *Front. Plant Sci.* 7, 1–15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00963>
- Zhang, H., He, H., Wang, Xuncheng, Wang, Xiangfeng, Yang, X., Li, L., Deng, X.W., 2011a. Genome-wide mapping of the HY5-mediated gene networks in *Arabidopsis* that involve both transcriptional and post-transcriptional regulation. *Plant J.* 65, 346–358. <https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2010.04426.x>
- Zhang, J., Chen, C., Zhang, D., Li, H., Li, P., Ma, F., 2014a. Reactive oxygen species produced via plasma membrane NADPH oxidase regulate anthocyanin synthesis in apple peel. *Planta* 240, 1023–1035. <https://doi.org/10.1007/s00425-014-2120-4>
- Zhang, K., Novak, O., Wei, Z., Gou, M., Zhang, X., Yu, Y., Yang, H., Cai, Y., Strnad, M., Liu, C.J., 2014b. *Arabidopsis* ABCG14 protein controls the acropetal translocation of root-synthesized cytokinins. *Nat. Commun.* 5, 1–12. <https://doi.org/10.1038/ncomms4274>
- Zhang, T., Maruhnich, S.A., Folta, K.M., 2011b. Green light induces shade avoidance symptoms. *Plant Physiol.* 157, 1528–1536.
- Zhang, W., Lorence, A., Gruszewski, H.A., Chevone, B.I., Nessler, C.L., 2009. AMR1, an *Arabidopsis* gene that coordinately and negatively regulates the mannose/l-galactose ascorbic acid biosynthetic pathway. *Plant Physiol.* 150, 942–950. <https://doi.org/10.1104/pp.109.138453>
- Zhang, X.N., Wu, Y., Tobias, J.W., Brunk, B.P., Deitzer, G.F., Liu, D., 2008. HFR1 is crucial for transcriptome regulation in the cryptochrome 1-mediated early response to blue light in *Arabidopsis thaliana*. *PLoS One* 3, 1–10. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0003563>
- Zhang, Y., Li, C., Zhang, J., Wang, J., Yang, J., Lv, Y., Yang, N., Liu, J., Wang, X., Palfalvi, G., Wang, G., Zheng, L., 2017. Dissection of HY5/HYH expression in *Arabidopsis* reveals a root-autonomous HY5-mediated photomorphogenic pathway. *PLoS One* 12, 1–15. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0180449>
- Zhang, Y., Zheng, S., Liu, Z., Wang, L., Bi, Y., 2011. Both HY5 and HYH are necessary regulators for low temperature-induced anthocyanin accumulation in *Arabidopsis* seedlings. *J. Plant Physiol.* 168, 367–374.
- Zhang, Z., Wang, J., Zhang, R., Huang, R., 2012. The ethylene response factor AtERF98 enhances tolerance to salt through the transcriptional activation of ascorbic acid synthesis in *Arabidopsis*. *Plant J.* 71, 273–287. <https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2012.04996.x>
- Zhao, D., Hao, Z., Tao, J., 2012. Effects of shade on plant growth and flower quality in the herbaceous peony (*Paeonia lactiflora* Pall.). *Plant Physiol. Biochem.* 61, 187–196. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2012.10.005>
- Zhao, H., Tan, J., 2005. Role of calcium ion in protection against heat and high irradiance stress-induced oxidative damage to photosynthesis of wheat leaves. *Photosynthetica* 43, 473–476.
- Zhao, L., Zhang, X., Shen, Y., Fang, X., Wang, Y., Wang, F., 2015. Obesity and iron deficiency: A quantitative meta-analysis. *Obes. Rev.* 16, 1081–1093. <https://doi.org/10.1111/obr.12323>
- Zhen, S., van Iersel, M.W., 2017. Far-red light is needed for efficient photochemistry and photosynthesis. *J. Plant Physiol.* 209, 115–122. <https://doi.org/10.1016/J.JPLPH.2016.12.004>
- Zheng, W., Wang, S.Y., 2001. Antioxidant activity and phenolic compounds in selected herbs.

- J. Agric. Food Chem. 49, 5165–5170. <https://doi.org/10.1021/jf010697n>
- Zheng, L., Zhang, Q., Zheng, K., Zhao, S., Wang, P., Cheng, J., 2020. Effects of diffuse light on microclimate of solar greenhouse, and photosynthesis and yield of greenhouse-grown tomatoes. *HortScience* 55, 1605–1613. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI15241-20>
- Zhou, P., Song, M., Yang, Q., Su, L., Hou, P., Guo, L., Zheng, X., Xi, Y., Meng, F., Xiao, Y., Yang, L., Yang, J., 2014. Both PHYTOCHROME RAPIDLY REGULATED1 (PAR1) and PAR2 promote seedling photomorphogenesis in multiple light signaling pathways. *Plant Physiol.* 164, 841–852. <https://doi.org/10.1104/pp.113.227231>
- Zhou, Y., Ni, M., 2009. SHB1 plays dual roles in photoperiodic and autonomous flowering. *Dev. Biol.* 331, 50–57. <https://doi.org/10.1016/j.ydbio.2009.04.023>
- Zhou, Y.H., Wu, J.X., Zhu, L.J., Shi, K., Yu, J.Q., 2009. Effects of phosphorus and chilling under low irradiance on photosynthesis and growth of tomato plants. *Biol. Plant.* 53, 378–382. <https://doi.org/10.1007/s10535-009-0071-6>
- Zhu, D., Maier, A., Lee, J.-H., Laubinger, S., Saijo, Y., Wang, H., Qu, L.-J., Hoecker, U., Deng, X.W., 2008a. Biochemical characterization of Arabidopsis complexes containing CONSTITUTIVELY PHOTOMORPHOGENIC1 and SUPPRESSOR OF PHYA proteins in light control of plant development. *Plant Cell* 20, 2307–2323. <https://doi.org/10.1105/tpc.107.056580>
- Zhu, K., Devine, A., Prince, R.L., 2009. The effects of high potassium consumption on bone mineral density in a prospective cohort study of elderly postmenopausal women. *Osteoporos. Int.* 20, 335–340. <https://doi.org/10.1007/s00198-008-0666-3>
- Zhu, X.G., Long, S.P., Ort, D.R., 2008b. What is the maximum efficiency with which photosynthesis can convert solar energy into biomass? *Curr. Opin. Biotechnol.* 19, 153–159. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2008.02.004>
- Zhuo, D., Okamoto, M., Vidmar, J.J., Glass, A.D.M., 1999. Regulation of a putative high-affinity nitrate transporter (Nrt2;1At) in roots of Arabidopsis thaliana. *Plant J.* 17, 563–568. <https://doi.org/10.1046/j.1365-313X.1999.00396.x>
- Zigler, J.S., Goosey, J.D., 1984. Singlet oxygen as a possible factor in human senile nuclear cataract development. *Curr. Eye Res.* 3, 59–65. <https://doi.org/10.3109/02713688408997187>
- Zimmermann, M.B., Hurrell, R.F., 2007. Nutritional iron deficiency. *Lancet* 370, 511–520. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(07\)61235-5](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(07)61235-5)
- Zindler-Frank, E., Hönow, R., Hesse, A., 2001. Calcium and oxalate content of the leaves of Phaseolus vulgaris at different calcium supply in relation to calcium oxalate crystal formation. *J. Plant Physiol.* 158, 139–144. <https://doi.org/10.1078/0176-1617-00045>
- Zino, S., Skeaff, M., Williams, S., Mann, J., 1997. Randomised controlled trial of effect of fruit and vegetable consumption on plasma concentrations of lipids and antioxidants. *BMJ* 314, 1787–1805. <https://doi.org/10.1136/bmj.314.7097.1787>
- Ziska, L.H., Bunce, J.A., 1994. Increasing growth temperature reduces the stimulatory effect of elevated CO₂ on photosynthesis or biomass in two perennial species. *Physiol. Plant.* 91, 183–190. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1994.tb00417.x>
- Zur, Y., Gitelson, A.A., Chumickova, O.B., Mezlyak, M.N., 2000. The spectral contribution of carotenoids to light absorption and reflectance in green leaves, in: *Proceedings of the 2nd International Conference Geospatial Information in Agriculture and Forestry*. pp. 1–7.

10. ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 2.1: Lichtspektrum der territorialen Solarstrahlung in Berlin Dahlem, Lentzeallee 75; eigene Messungen am 24.06.2019 um 13:08 Uhr; gemessen mit dem SpectraWiz Spectroradiometer PS-100	4
Abbildung 2.2: Veränderung der spektralen Lichtzusammensetzung in Abhängigkeit von der Tageszeit in Berlin Dahlem, Lentzeallee 75; Messtag: 09.04.2019; gemessen mit dem SpectraWiz Spectroradiometer PS-100; dargestellt sind die Messwerte (Punkte) und Trendlinien als Polynom vierten Grades; Icons zeigen Sonnenaufgang, Tageshöchststand und Sonnenuntergang (eigene Messung)	6
Abbildung 2.3: Tageslänge in Hanoi im Jahresverlauf; Dämmerung bezieht sich auf die astronomische Dämmerung mit einem Sonnenstand von 12-18° unterhalb des Horizonts (TIME AND DATE AS, 2018a)	6
Abbildung 2.4: Tageslänge in Berlin im Jahresverlauf (bezogen auf Winterzeit); Dämmerung bezieht sich auf die astronomische Dämmerung mit einem Sonnenstand von 12-18° unterhalb des Horizonts (TIME AND DATE AS, 2018b)	6
Abbildung 2.5: Veränderung der spektralen Lichtzusammensetzung im Jahresverlauf in Berlin Dahlem, Lentzeallee 75; Messzeitpunkt: Tageshöchststand der Sonne, Witterung: sonnig; gemessen mit dem SpectraWiz Spectroradiometer PS-100; dargestellt sind die Messwerte (Punkte) und Trendlinien als Polynom dritten Grades	7
Abbildung 2.6: Bewölkung, Niederschlag, relative Luftfeuchtigkeit, Temperatur und PAR-Wert (angegeben in deka W/m ²) in Hanoi im Tagesverlauf; Daten für den 27.01.2019, Trockenzeit in Hanoi, Vietnam; 1 W/m ² entspricht 2,3 µmol m ⁻² s ⁻¹ (eigene Abbildung mit Daten nach: METEOBLUE, 2018)	8
Abbildung 2.7: Bewölkung, Niederschlag, relative Luftfeuchtigkeit, Temperatur und PAR-Wert (angegeben in W/m ²) in Hanoi im Tagesverlauf; Daten für den 17.08.2018, Regenzeit in Hanoi, Vietnam; 1 W/m ² entspricht 2,3 µmol m ⁻² s ⁻¹ (eigene Abbildung mit Daten nach: METEOBLUE, 2018)	8
Abbildung 2.8: Lichtspektrum Sonnenlicht und Veränderungen durch Cirrus-(Eis) Wolken bzw. Cumulus-(Wasser) Wolken in Berlin Dahlem, Lentzeallee 75; eigene Messungen am 13.08.2018 um 12:00 Uhr (Cirruswolken) und 14.08.2018 um 12:00 Uhr (Cumuluswolken); gemessen mit dem SpectraWiz Spectroradiometer PS-100	9
Abbildung 2.9: Lichtspektrum Sonnenlicht mit und ohne Baumschatten in Berlin Dahlem, Lentzeallee 75 (eigene Messung am 14.08.2018 um 12:00 Uhr); Reduktion des R:FR-Verhältnisses von 1,27 (sonnig) auf 0,53 (Baumschatten); gemessen mit dem SpectraWiz Spectroradiometer PS-100	10
Abbildung 2.10: Lichtspektrum Fluoreszenzlampe Innenraum; Typ: OSRAM L 58W/21-840; gemessen mit dem SpectraWiz Spectroradiometer PS-100	11
Abbildung 2.11: Lichtspektrum Natriumhochdrucklampen (SON-K400, 400W) im Forschungsgewächshaus der Humboldt-Universität zu Berlin: Berlin Dahlem, Albrecht-Thaer-Weg; gemessen mit dem SpectraWiz Spectroradiometer PS-100	12
Abbildung 2.12: Gewächsschrank mit LED-Beleuchtung im Supermarkt (eigene Aufnahme: aufgenommen in EDEKA, Templiner Straße 12, 10119 Berlin)	13
Abbildung 2.13: Photosynthetische Transformation von Lichtenergie zu energiereichen Verbindungen über den linearen Elektronentransport. Absorption von Sonnenlicht durch Pigmente der Lichtsammelkomplexe. Weiterleitung zu den reaktiven Zentren der Photosysteme II und I. Elektronentransportkette von Photosystem II über Phäophytin (Phe), Plastoquinone A und B (QA, QB), Cytochrome (CYT) und Plastocyanin (PC) zum Photosystem I (GREEN und DURNFORD, 1996). Elektronen werden anschließend weitergeleitet über spezialisierte Chlorophylle (A0), Phylloquinon (A1), Eisen-Schwefel-Proteine (FeS) und Ferredoxin (Fd). Photosynthetische Elektronentransportkette dient der Konvertierung von Lichtenergie zu Reduktionsenergie (NADPH) und chemischem Energiepotential (ATP) (BUKHOV, 2004; ROCHAIX, 2011; SONNEWALD, 2014) (eigene Abbildung)	17
Abbildung 2.14: Absorptionsspektren photosynthetisch wirksame Pigmente, adaptiert von RUNGRAT et al., 2016; gestrichelte orange Linie: β-Carotin, grün: Chlorophyll a, olivgrün: Chlorophyll b; durchgezogene grüne Linie: Absorptionsspektrum aller photosynthetisch aktiven Pigmente	19

Abbildung 2.15: Absorptionsspektren wichtiger Photorezeptoren: Absorptionsspektren FAD und FADH ⁺ nach KOTTKE et al. (2017), Absorptionsspektren Pr und Pfr nach LI et al.(2011), Absorptionsspektrum Phototropin nach BRIGGS und CHRISTIE (2002)	21
Abbildung 2.16: Cryptochrome Photozyklus; FAD (inaktiv) wird blaulichtinduziert reduziert zu dem signalübermittelnden FADH ⁺ mit dem kurzlebigen FAD ⁺ als Zwischenstufe; durch Grünlicht wird FADH ⁺ reduziert zum inaktiven FADH ⁺ mit dem kurzlebigen FADH ⁺ * als Zwischenstufe; in Dunkelheit kommt es zur Akkumulation der inaktiven Formen FAD und FADH ⁺ ; eigene Abbildung mit Angaben von BOULY et al. (2007).	23
Abbildung 2.17: Schematische Darstellung des lichtinduzierten Netzwerks. Eine lichtabhängige Aktivierung der Photorezeptoren ermöglicht eine Interaktion mit negativen Regulatoren, die dadurch inaktiviert werden (COP= CONSTITUTIVE PHOTOMORPHOGENIC 1, DET= DE-ETIOLATED, FUS= FUSCA, PIF=PHYTOCHROME INTERACTING FACTORS). Dies steigert die Aktivität der positiven Regulatoren der Photomorphogenese (HY5= ELONGATED HYPOCOTYL5, HYH= HY5 HOMOLOG, LAF1= LONG AFTER FAR-RED LIGHT 1, HFR1= LONG HYPOCOTYL IN FAR-RED 1) (BROWN und JENKINS, 2008; GANGAPPA und BOTTO, 2016; HEIJDE und ULM, 2012; LAU und DENG, 2012a; LI et al., 2011a); eigene Abbildung.....	25
Abbildung 2.18: Einbindung des ELONGATED HYPOCOTYL 5 (HY5) in die photorezeptorvermittelte Regulation von Photomorphogenese, Hormonsignalübertragung, N-Assimilation und Pigmentsynthese (CATALA et al., 2011; CHEN et al., 2016; DELKER et al., 2014; GANGAPPA und BOTTO, 2016; HOLM et al., 2002; JANG et al., 2013; JONASSEN et al., 2008; LAU und DENG, 2012; LEE et al., 2007; LI et al., 2011a; MARTÍNEZ-GARCÍA et al., 2000; SAIJO et al., 2003; SHI et al., 2011; SHIN et al., 2013; SHIN et al., 2007a; SIBOUT et al., 2006; SRIVASTAVA et al., 2015; STRACKE et al., 2010; SUN und NI, 2011; TOH et al., 2012; TOLEDO-ORTIZ et al., 2014; YANAGISAWA, 2014; ZHANG et al., 2016; ZHANG et al., 2011c; ZHU et al., 2008a); eigene Abbildung.....	26
Abbildung 2.19: Einbindung der Phytochrome-Interacting-Factors (PIF) in die photorezeptorvermittelte Regulation von Photomorphogenese, Hormonsignalübertragung und Pigmentsynthese: Bei Belichtung werden die PIFs photorezeptorvermittelt durch Phosphorylierung inaktiviert (AL-SADY et al., 2006; LEIVAR und QUAIL, 2011; PHEE et al., 2008). In den Abendstunden wird die Expression von PIF4 und PIF5 durch den ELF4-ELF3-LUX-Komplex (EARLY FLOWERING 4, EARLY FLOWERING 3 und LUX ARRHYTHMO) unterdrückt. Durch längere Dunkelperioden, unterstützt durch DET1 (DONG et al., 2014) und COP1 (BAUER et al., 2004) kommt es zu einer Reakkumulation der PIFs, die ihr Aktivitätsmaximum in den Morgenstunden haben (NUSINOW et al., 2012).....	28
Abbildung 2.20: Einbindung des CONSTITUTIVE PHOTOMORPHOGENIC 1 (COP1)/ SPA-Komplexes in die photorezeptorvermittelte Regulation von Photomorphogenese, Blütezeit und Anthocyaninsynthese. Unterstützt werden die COP1-Aktivitäten durch SPA (HOECKER und QUAIL, 2001; LAUBINGER et al., 2004; LIAN et al., 2011; LIU et al., 2011; SOO SEO et al., 2003; ZHU et al., 2008a), den CDD-Komplex (LAU und DENG, 2012), SHW1 (SHORT HYPOCOTYL IN WHITE LIGHT1) (BHATIA et al., 2011; SRIVASTAVA et al., 2015) und PIFs (XU et al., 2014). COP1 wirkt als negativer Regulator von Phy A und B (JANG et al., 2010; SEO et al., 2004) (JANG et al., 2010), CO (CONSTANS) und GI (GIGANTEA) (YU et al., 2008), PAP (=PRODUCTION OF ANTHOCYANIN PIGMENT) 1 und 2 (LI et al., 2012c; MAIER et al., 2013), HY5, HYH, MYB (HOLM et al., 2001; ULJON et al., 2016), LAF1 (BAUER et al., 2004; SOO SEO et al., 2003), HFR1 (DUEK et al., 2004; DUEK und FANKHAUSER, 2003), und ELF3 (NIETO et al., 2015). Durch Cry1, PhyA und PhyB wird die COP1-Aktivität unterdrückt (CHEN et al., 2015; HONG et al., 2008; JIAO et al., 2007; LAU und DENG, 2012; LI et al., 2011a; LIU et al., 2011; SHEERIN et al., 2015; WANG et al., 2001; YANG et al., 2001)	30
Abbildung 2.21: spektrale Lichtzusammensetzung bei Schattierung durch benachbarte Pflanzen (eigene Messung am 14.08.2018 um 12:00 Uhr in Berlin Dahlem, Lentzeallee 75; gemessen mit dem SpectraWiz Spectroradiometer PS-100), resultierende Veränderungen der Phytohormonkonzentrationen und Schattenvermeidungsreaktionen (eigene Abbildung)	33
Abbildung 2.22: Entstehung reaktiver Sauerstoffspezies in den Chloroplasten: Durch einen Energietransfer von Triplettchlorophyll auf Sauerstoff entsteht Singulett-Sauerstoff (SCHÄFER und SCHMID, 1993; TURRO, 1972). Eine Reduktion von Sauerstoff führt zur Bildung von Superoxid (ASADA, 2006, 1999; ROCHAIX, 2011). Dieses kann über Superoxiddismutasen in Wasserstoffperoxid (H ₂ O ₂) umgewandelt werden (ASADA, 2006) oder durch eine Reaktion mit Stickstoffmonoxid (NO [•])	

zu Peroxynitrit (ONOO^-) reagieren (SAITO et al., 2006). Wasserstoffperoxid wird durch das antioxidativ-wirkende Enzym Katalase oder im Rahmen des Ascorbat-Glutathion-Zyklus in Wasser (H_2O) überführt (ASADA, 2006). Durch die Fenton-Reaktion ist auch die Bildung von Hydroxylradikalen (OH^\cdot) möglich (BARTOSZ, 1997). Blau gekennzeichnet sind beteiligte Enzyme, Rot/ grün: negative/positive Wirkungen der Metabolite, gelb: grundlegende Reaktionen oder Zyklen

..... 37

Abbildung 2.23: Schematische Darstellung der Synthese via L-Galaktose-Biosyntheseweg, Oxidation, Recycling über den Glutathion-Ascorbat-Zyklus und Abbau von Ascorbinsäure; in Anlehnung an LAING et al.(2017)..... 40

Abbildung 2.24: Funktionen der Ascorbinsäure; orange dargestellt ist der Elektronentransport vom PSI bzw. Zytoplasma über MDHA/Ascorbinsäure (FORTI und EHRENHEIM, 1993; MIYAKE und ASADA, 1992); lila dargestellt ist die Regenerierung von Tocopherolen (MUNNÉ-BOSCH, 2005; NIKI, 1987); türkis dargestellt Ascorbinsäure als Cofaktor der Violaxanthin-Epoxidase (BRATT et al., 1995; ESKLING und ÅKERLUND, 1998; MULLER-MOULE et al., 2002); rot dargestellt die Reduzierung von Radikalen (ARRIGONI und DE TULLIO, 2002; BAGCHI et al., 1997; CASTILLO und GREPPIN, 1988; CHOU und KHAN, 1983; GOTOH und NIKI, 1992; LAW et al., 1983); grün dargestellt DHA/Ascorbat als Präcursor für Oxalat (DEBOLT et al., 2006; NAKATA, 2003; SAITO, 1996); braun dargestellt die Reduktion von Monolignolradikal (OTTER und POLLE, 1994; TAKAHAMA und ONIKI, 2017); blau dargestellt die Reduktion von Metallen im Zentrum von Enzymen (DAVEY et al., 2000); grau dargestellt die Reduktion von Dehydroascorbinsäure durch Glutathion (CHEN et al., 2003; LAING et al., 2017)..... 42

Abbildung 2.25: Carotinoidsynthese in Pflanzen (nach Informationen von CAZZONELLI und POGSON, 2010; CUNNINGHAM et al., 1996; GANJEWALA und KUMAR, 2008; GARCIA-ASUA et al., 1998; HARDING und TURNER, 1981; HUNTER, 2007)..... 44

Abbildung 2.26: Polyphenolsynthese in Pflanzen und Überblick über ausgewählte Funktionen der einzelnen Untergruppen: Über den Shikimatsäureweg werden die Ausgangsstoffe der Polyphenole, Phenylalanin und Tyrosin, bereit gestellt (FRASER und CHAPPLE, 2011); Deaminierung von Phenylalanin zu Zimtsäure, dann Oxidation zu p-Cumaroyl-CoA umgewandelt wird bzw. Konvertierung von Tyrosin zu p-Cumaroyl-CoA mit; Kondensation von p-Cumaroyl-CoA mit drei Molekülen Malonyl-CoA zu Tetrahydroxychalkon (CHOUHAN et al., 2017); p- Cumaroyl- CoA kann zudem verwendet werden für die Bildung von Phenolsäuren und Stilbenen (FRASER und CHAPPLE, 2011) (FRASER und CHAPPLE, 2011; KOZUKUE et al., 1979; WATTS et al., 2006); Umbau von Tetrahydroxychalkon in Flavonoiden, Isoflavonoiden und Neoflavonoiden (LOA et al., 2009); Modifizierungen am C-Ring durch Dehydrogenierung, Hydroxylierung und Oxidation führen zu den Untergruppen der Flavonoide: Flavone, Flavanole, Flavanone, Flavanonole, Flavonole und Anthocyane (CHOUHAN et al., 2017; IWASHINA, 2015; VEITCH und GRAYER, 2011)..... 48

Abbildung 2.27: Schematische Darstellung der Beeinflussung von passiver und aktiver Mineralstoffaufnahme. Die passive Aufnahme beruht auf Transpirationsströmen (NOVÁK und VIDOVIČ, 2003; OTTOSEN et al., 2002; SILBERBUSH et al., 2005; SILBERBUSH und BEN-ASHER, 2001), die unter anderem durch Licht, Temperatur und Luftfeuchtigkeit beeinflusst werden (DRAKE et al., 1970; GORHAM, 1987; OTTOSEN et al., 2002; PONS et al., 2001). Aktiv werden Mineralstoffe über Transporter aufgenommen (SAMAL et al., 2010), die durch Bedarf und externe Faktoren, einschließlich den Lichtbedingungen, reguliert werden (LIU et al., 2003; MANZOOR ALAM, 1999). 53

Abbildung 2.28: Bildung reaktiver Sauerstoffspezies in den Mitochondrien; In den Mitochondrien wird Superoxid ($\text{O}_2^{\cdot-}$) entweder enzymatisch (Xanthinoxidase) oder nicht-enzymatisch (in den Komplexen I und III mit UQ_{10} (Ubisemiquinone) als Elektronendonator) gebildet. Dieses kann über Superoxiddismutasen in Wasserstoffperoxid (H_2O_2) umgewandelt werden oder durch eine Reaktion mit Stickstoffmonoxid (NO^\cdot) zu Peroxynitrit (ONOO^-) reagieren. Wasserstoffperoxid wird durch antioxidant-wirkende Enzyme Katalase oder Glutathionperoxidase in Wasser (H_2O) überführt. Durch die Fenton-Reaktion ist auch die Bildung von Hydroxylradikalen (OH^\cdot) möglich; Blau gekennzeichnet sind beteiligte Enzyme, Rot: Wirkungen der Metabolite; Quellen und Inspirationen: RAHA und ROBINSON (2000); SZABÓ und OHSHIMA (1997)..... 63

Abbildung 2.29: Funktionen Vitamin A-wirksamer Substanzen beim Menschen: β -Carotin wird im Körper oxidativ gespalten zu all-trans-Retinal; Grün dargestellt: über all-trans-Retinol wird all-trans-Retinal umgewandelt in 11-cis-Retinal, welches mit Opsin Rhopsin bildet. Durch Lichteinfall wird die Verbindung getrennt und wieder all-trans-Retinal gebildet. Der Zyklus ist verantwortlich für die

farbneutrale Lichtwahrnehmung; Als weiterer wichtiger Metabolit wird all-trans-Retinal irreversibel zu all-trans-Retinsäure oxidiert. Durch Bindung an Retinoidrezeptoren wird die Expression zahlreicher Gene reguliert (blau dargestellt) (AL TANOURY et al., 2013; MEY, 2017; MORA et al., 2008)	68
Abbildung 2.30 a, b: <i>P. odorata</i> , Blattoberseite mit typischem Fleck und Blattunterseite mit leichter Burgunderrotfärbung	81
Abbildung 2.31 a-d: <i>P. odorata</i> : (a) kultiviert im Gewächshaus (Berlin Dahlem), (b) geerntete Pflanzen in Vietnam, (c) Anbau von <i>P. odorata</i> in einem Hausgarten in Vietnam (d) <i>P. odorata</i> wildwachsend an einem Fluss in Vietnam	82
Abbildung 2.32 a-d: Beispiele für die Verwendung von <i>P. odorata</i> in der asiatischen Küche	83
Abbildung 4.1: Überblick über Versuchsreihen in der Klimakammer mit zusätzlicher LED-Bestrahlung; angegeben sind die Wachstumsbedingungen, der Zeitraum der jeweiligen Versuche und die durchgeführten Varianten: durchgestrichene LEDs: keine zusätzliche Bestrahlung mit LEDs, entspricht den Kontrollbedingungen; die LED-Bestrahlung wurde nur zusätzlich zur Hintergrundbestrahlung („tagsüber“) durchgeführt; FL+R steht für eine Ergänzung der Grundbelichtung durch rote LEDs, FLr ist die zugehörige Kontrolle ohne LEDs; FL+G steht für eine Ergänzung der Grundbelichtung durch grüne LEDs, FLg ist die zugehörige Kontrolle ohne LEDs; FL+B steht für eine Ergänzung der Grundbelichtung durch blaue LEDs, FLb ist die zugehörige Kontrolle ohne LEDs.	88
Abbildung 4.2: Überblick über Versuchsreihen im Gewächshaus mit zusätzlicher LED-Bestrahlung; angegeben sind die Versuchsreihen mit dem jeweiligen Zeitraum und die durchgeführten Varianten: durchgestrichene LEDs: keine zusätzliche Bestrahlung mit LEDs, entspricht den Kontrollbedingungen; die Bestrahlungszeit zeigt an, ob die zusätzliche Bestrahlung tagsüber („Sonne“), nachts („Dunkelheit“) oder ganztätig („Sonne“ und „Dunkelheit“) stattgefunden hat; NL=Natürliches Licht, ohne zusätzliche LEDs (=Kontrollvariante), NL+B=Natürliches Licht + blaue LEDs, NL+G=Natürliches Licht + grüne LEDs, NL+R=Natürliches Licht + rote LEDs	89
Abbildung 4.3: Überblick über Versuchsreihen in der Klimakammer mit Lichtmodifikationen durch photoselektive Folien; angegeben sind die Wachstumsbedingungen, der Zeitraum der jeweiligen Versuche und die durchgeführten Varianten: durchgestrichene Folien: ohne Lichtmodifizierung, entspricht den Kontrollbedingungen; FL+HMG55%= Überdeckung der Pflanzen mit der Half Minus Green-Folie, erreichte Lichtintensität: 55% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLh2), FL+PL40%= Überdeckung der Pflanzen mit der Pale Lavander-Folie, erreichte Lichtintensität: 40% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLp2), FL+HMG72%= Überdeckung der Pflanzen mit der Half Minus Green-Folie, erreichte Lichtintensität: 72% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLh1), FL+PL57%= Überdeckung der Pflanzen mit der Pale Lavander-Folie, erreichte Lichtintensität: 57% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLp1)	89
Abbildung 4.4: Überblick über Versuchsreihen im Gewächshaus mit Lichtmodifikationen durch photoselektive Folien; angegeben sind die Versuchsreihen mit dem jeweiligen Zeitraum und die durchgeführten Varianten: durchgestrichene Folien: ohne Lichtmodifizierung, entspricht den Kontrollbedingungen (=NL); NL+HMG= Überdeckung der Pflanzen mit der Half Minus Green-Folie, NL+PL= Überdeckung der Pflanzen mit der Pale Lavander-Folie	90
Abbildung 4.5: Verwendete Charakterisierung der spektralen Lichtzusammensetzung: 401-450 nm \triangleq kurzwelliges Blaulicht, 451-500 nm \triangleq langwelliges Blaulicht, 501-550 nm \triangleq kurzwelliges Grünlicht, 551-600 nm \triangleq langwelliges Grünlicht, 601-650 nm \triangleq kurzwelliges Rotlicht, 651-700 nm \triangleq langwelliges Rotlicht; 401-500 nm : 601-700 nm \triangleq B:R;	91
Abbildung 4.6: Zeitplan für die Versuchsdurchführung und Untersuchungen der Inhaltsstoffe, Pflanzenwachstumsparameter sowie der Kultivierungsbedingungen	93
Abbildung 4.7: Lichtspektrum der Leuchtstoffröhren F58W/827 (Sylvania, Luxline Plus, Germany), gemessen mit dem AvantesAvaSpec NIR 256 Spektrometer	95
Abbildung 4.8: Lichtspektrum im Freiland vs. Gewächshaus (ohne und mit Energieschirm); gemessen am 06.08.2018 um 12:30 Uhr mit dem SpectraWiz Spectroradiometer PS-100, Witterung: sonnig	96
Abbildung 4.9: Durchschnittliche Lichtmenge [klx/ m ²] im Tagesverlauf während der Versuchsdurchführungen im Gewächshaus (1 klx entspricht etwa 18,5 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ PAR-Wert; Quelle: MEYER, 1996).....	97

Abbildung 4.10: Tageslichtsummen [klx/ m ²] an einzelnen Versuchstagen bei den Versuchsreihen „GwH13“, „GwH14, „GwH14, nachts“ und „GwH14, 24h“ im Gewächshaus (1 klx entspricht etwa 18,5 μmol m ⁻² s ⁻¹ PAR-Wert; Quelle: MEYER, 1996)	98
Abbildung 4.11: Verteilung der Varianten bei Gewächshausversuchen und die jeweilige PAR-Wert der Natriumhochdruck (HS)-lampe (SON-K400, 400W) auf Pflanzenhöhe; natürliche Sonnenstrahlung ist nicht in den Werten enthalten	98
Abbildung 4.12: Lichtspektrum im Gewächshaus mit bzw. ohne zusätzliche Beleuchtung durch Natriumhochdrucklampen; gemessen wurde unterhalb der Natriumhochdrucklampen; gemessen am 20.08.2018 um 11:30 Uhr, Witterung: bewölkt; PAR-Wert ohne Zusatzbeleuchtung: 251 μmol m ⁻² s ⁻¹ , PAR-Wert mit Zusatzbeleuchtung: 338 μmol m ⁻² s ⁻¹ ; gemessen mit dem SpectraWiz Spectoradiometer PS-100.....	99
Abbildung 4.13 a-d: Temperaturverlauf während der Versuchszeiträume „GwH13“, „GwH14“, „GwH14, nachts“ und „GwH14, 24 h“ im Gewächshaus; die gelbe Linie zeigt die mittleren Tagestemperaturen mit jeweiligen Maximal- und Minimalwerten, die blaue Linie die mittleren Nachttemperaturen mit jeweiligen Maximal- und Minimalwerten	101
Abbildung 4.14: Wellenspektrum der verwendeten LED-Beleuchtung (gemessen mit dem AvantesAvaSpec NIR 256 Spektrometer).....	102
Abbildung 4.15 a-c: Kultivierung von <i>P. odorata</i> in der Klimakammer mit zusätzlicher LED-Beleuchtung (rechts); Pflanzen vor (rechts oben) und nach (rechts unten) der Kultivierung in der Klimakammer.....	102
Abbildung 4.16: Vergleich des Lichtspektrums in der Klimakammer ohne LEDs (gestrichelte graue Linie) und mit zusätzlicher Bestrahlung durch LEDs (blau, grün und rot); dargestellt sind für die Varianten mit LEDs jeweils nur die veränderten Spektralbereiche; gemessen mit dem AvantesAvaSpec NIR 256 Spektrometer	103
Abbildung 4.17: Kultivierung von <i>P. odorata</i> im Gewächshaus mit zusätzlicher LED-Beleuchtung	103
Abbildung 4.18 a,b: Veränderung des Lichtspektrums durch LEDs bei unterschiedlichen PAR-Werten des natürlichen Lichts (gestrichelte graue Linie), gemessen mit dem SpectraWiz Spectoradiometer PS-100.....	104
Abbildung 4.19: Lichtdurchlässigkeit der verwendeten Folien (rot: „HMG“, lila: „PL“); gemessen mit dem Unicam UV/VIS Spektrometer UV2	105
Abbildung 4.20: Kultivierung von <i>P. odorata</i> in der Klimakammer ohne und mit photoselktiven Folien („HMG“)	105
Abbildung 4.21: Lichtspektrum der Leuchtstoffröhren in der Klimakammer ohne und mit Folien; berechnet in Relation zur relativen Bestrahlungsenergie der Kontrolle (=FL ohne Folie), grau gestrichelt: Kontrollbeleuchtung (=FL), rot: Lichtmodifizierung durch HMG-Folie, lila: Lichtmodifizierung durch PL-Folie; gemessen mit dem AvantesAvaSpec NIR 256 Spektrometer	106
Abbildung 4.22: Kultivierung von <i>P. odorata</i> im Gewächshaus mit Überdeckung durch photoselktive Folien (links: Half Minus Green-Folie, rechts: Pale Lavander-Folie)	107
Abbildung 4.23: Lichtspektrum natürliches Licht im Gewächshaus (mit Schattierung) ohne und mit Folien; gemessen am 06.08.2018 um 12:30 Uhr mit dem SpectraWiz Spectoradiometer PS-100, Witterung: sonnig.....	107
Abbildung 4.24: graphisch dargestellte Lichtverteilung in der Klimakammer, Messung der PAR-Werte (μmol m ⁻² s ⁻¹), emittiert von den Leuchtstoffröhren (=Kontrollbeleuchtung) auf Pflanzenhöhe (20 cm über Boden) und an 13 Messpunkten; gemessen mit: Chlorophyll Fluorimeter PAM-2000 (Walz, Deutschland).....	112
Abbildung 4.25: Zusammenhang zwischen Tageslichtsumme und Frischmasse [g/ Pflanze] in der Klimakammer; Unterschiede der Lichtzusammensetzung nicht berücksichtigt. grau: FL, blau: FL+B, grün: FL+G, rot: FL+R, lila: FL+PL, dunkelrot: FL+HMG; Regressionsgerade mit Regressionskoeffizienten (R ²) und Formel wurden für die Kontrollen berechnet	118
Abbildung 5.1: Zusammenhang zwischen durchschnittlicher Tageslichtsumme an den letzten drei Versuchstagen vor der Probenahme und dem Ascorbinsäuregehalt [mg/ 100 g FM] der Kontrollen im Gewächshaus; Quadrate: „GwH13“, Kreise: „GwH14“, Rauten: „GwH14, nachts“, Dreiecke: „GwH14, 24h“; Regressionsgerade mit Regressionskoeffizienten (R ²) und Formel bezieht sich auf die Kontrollen (grau).....	121

Abbildung 5.2: Zusammenhang zwischen Tageslichtsumme und dem Ascorbinsäuregehalt in der Klimakammer; Unterschiede der Lichtzusammensetzung nicht berücksichtigt. Dargestellt sind Mittelwerte der einzelnen Varianten (n=4); grau: FL, blau: FL+B, grün: FL+G, rot: FL+R, lila: FL+PL, dunkelrot: FL+HMG; Regressionsgerade mit Regressionskoeffizienten (R^2) und Formel bezieht sich auf die Kontrollen (grau).....	124
Abbildung 5.3: Zusammenhang zwischen durchschnittlicher Tageslichtsumme an den letzten drei Versuchstagen vor Probenahme und Carotinoidgehalt [mg/ 100 g FM] im Gewächshaus; Quadrate: „GwH13“, Kreise: „GwH14“, Rauten: „GwH14, nachts“, Dreiecke: „GwH14, 24h“; Regressionsgerade mit Regressionskoeffizienten (R^2) und Formel bezieht sich auf die Kontrollen (grau).....	129
Abbildung 5.4: Zusammenhang zwischen Tageslichtsumme und dem Carotinoidgehalt in der Klimakammer. Dargestellt sind Mittelwerte der einzelnen Varianten (n=4); grau: FL, blau: FL+B, grün: FL+G, rot: FL+R, lila: FL+PL, dunkelrot: FL+HMG; Regressionsgerade mit Regressionskoeffizienten (R^2) und Formel bezieht sich auf die Kontrollen (grau).....	131
Abbildung 5.5: Zusammenhang zwischen durchschnittlicher Tageslichtsumme an den letzten drei Versuchstagen vor Probenahme und Polyphenolgehalt [mg/ 100 g FM] im Gewächshaus; Quadrate: „GwH13“, Kreise: „GwH14“, Rauten: „GwH14, nachts“, Dreiecke: „GwH14, 24h“; Regressionsgerade mit Regressionskoeffizienten (R^2) und Formel bezieht sich auf die Kontrollen (grau).....	136
Abbildung 5.6: Zusammenhang zwischen Tageslichtsumme und dem Polyphenolgehalt in der Klimakammer; Unterschiede der Lichtzusammensetzung nicht berücksichtigt. Dargestellt sind Mittelwerte der einzelnen Varianten (n=4); grau: FL, blau: FL+B, grün: FL+G, rot: FL+R, lila: FL+PL, dunkelrot: FL+HMG; Regressionsgerade mit Regressionskoeffizienten (R^2) und Formel bezieht sich auf die Kontrollen (grau).....	139
Abbildung 5.7: Zusammenhang zwischen durchschnittlicher Tageslichtsumme an den letzten drei Versuchstagen vor Probenahme und antioxidativer Kapazität [mg TEAC/ 100 g FM] im Gewächshaus; Quadrate: „GwH13“, Kreise: „GwH14“, Rauten: „GwH14, nachts“, Dreiecke: „GwH14, 24h“; Regressionsgerade mit Regressionskoeffizienten (R^2) und Formel bezieht sich auf die Kontrollen (grau).....	145
Abbildung 5.8: Zusammenhang zwischen durchschnittlicher Tagestemperatur an den letzten drei Versuchstagen vor Probenahme und antioxidativer Kapazität [mg TEAC/ 100 g FM] im Gewächshaus; Quadrate: „GwH13“, Kreise: „GwH14“, Rauten: „GwH14, nachts“, Dreiecke: „GwH14, 24h“; Regressionsgerade mit Regressionskoeffizienten (R^2) und Formel bezieht sich auf die Kontrollen (grau).....	146
Abbildung 5.9: Zusammenhang zwischen Tageslichtsumme und antioxidativer Kapazität in der Klimakammer; Unterschiede der Lichtzusammensetzung nicht berücksichtigt. Dargestellt sind Mittelwerte der einzelnen Varianten (n=4); grau: FL, blau: FL+B, grün: FL+G, rot: FL+R, lila: FL+PL, dunkelrot: FL+HMG; Regressionsgerade mit Regressionskoeffizienten (R^2) und Formel bezieht sich auf die Kontrollen (grau).....	148
Abbildung 5.10: Zusammenhang zwischen durchschnittlicher Tageslichtsumme an den letzten drei Versuchstagen vor Probenahme und Flavonoidgehalt [mg/ 100 g FM] im Gewächshaus; Quadrate: „GwH13“, Kreise: „GwH14“, Rauten: „GwH14, nachts“, Dreiecke: „GwH14, 24h“; Regressionsgerade mit Regressionskoeffizienten (R^2) und Formel bezieht sich auf die Kontrollen (grau).....	155
Abbildung 5.11: Zusammenhang zwischen Tageslichtsumme und dem Flavonoidgehalt in der Klimakammer; Unterschiede der Lichtzusammensetzung nicht berücksichtigt. Dargestellt sind Mittelwerte der einzelnen Varianten (n=4); grau: FL, blau: FL+B, grün: FL+G, rot: FL+R, lila: FL+PL, dunkelrot: FL+HMG; Regressionsgerade mit Regressionskoeffizienten (R^2) und Formel bezieht sich auf die Kontrollen (grau).....	158
Abbildung 5.12: Blattunterseite von <i>P. odorata</i> zu Versuchsende nach Kultivierung mit zusätzlicher roter LED-Bestrahlung im Gewächshaus; links: Versuchsreihe „GwH13“, rechts: Versuchsreihe „GwH14, 24h“.....	160
Abbildung 5.13: Zusammenhang zwischen durchschnittlicher Tageslichtsumme an den letzten drei Versuchstagen vor Probenahme und Anthocyanengehalt [mg/ 100 g FM] im Gewächshaus; Quadrate: „GwH13“, Kreise: „GwH14“, Rauten: „GwH14, nachts“, Dreiecke: „GwH14, 24h“;	

Regressionsgerade mit Regressionskoeffizienten (R^2) und Formel bezieht sich auf die Kontrollen (grau)	161
Abbildung 5.14: Zusammenhang zwischen Trockenmasse [g/ Pflanze] und dem Calciumgehalt [mg g^{-1} TM] in den Versuchsreihen „KK13“ und „GwH13“; grau: FL/ NL, blau: FL+B/ NL+B, grün: FL+G/ NL+G, rot: FL+R/ NL+R, lila: FL+PL/ NL+PL, rosa: FL+HMG/ NL+HMG; Linie: Regressionsgerade mit Regressionskoeffizienten (R^2) und Formel	166
Abbildung 5.15: Zusammenhang zwischen Trockenmasse [g/ Pflanze] und dem Magnesiumgehalt [mg g^{-1} TM] in den Versuchsreihen „KK13“ und „GwH13“; grau: FL/ NL, blau: FL+B/ NL+B, grün: FL+G/ NL+G, rot: FL+R/ NL+R, lila: FL+PL/ NL+PL, rosa: FL+HMG/ NL+HMG; Linie: Regressionsgerade mit Regressionskoeffizienten (R^2) und Formel	167
Abbildung 5.16: Zusammenhang zwischen Tageslichtsumme und dem Nitratgehalt [mg g^{-1} TM] von <i>P. odorata</i> , kultiviert in der Klimakammer; Dargestellt sind Einzelwerte der Varianten (n=4); grau: FL, blau: FL+B, grün: FL+G, rot: FL+R, lila: FL+PL, dunkelrot: FL+HMG; Regressionsgerade mit Regressionskoeffizienten (R^2) und Formel bezieht sich auf die Kontrollen (grau).....	169
Abbildung 5.17: Zusammenhang zwischen Wassergehalt und dem Nitratgehalt; Versuch in der Klimakammer. grau: FL, blau: FL+B, grün: FL+G, rot: FL+R, lila: FL+PL, dunkelrot: FL+HMG; Linie: Regressionsgerade mit Regressionskoeffizienten (R^2) und Formel; Pearsonscher Korrelationskoeffizient für den Zusammenhang: $r=0,73$	172
Abbildung 5.18: Zusammenhang zwischen Tageslichtsumme und dem Phosphorgehalt [mg g^{-1} TM] von <i>P. odorata</i> , kultiviert in der Klimakammer; Dargestellt sind Einzelwerte der Varianten (n=4); grau: FL, blau: FL+B, grün: FL+G, rot: FL+R, lila: FL+PL, dunkelrot: FL+HMG; Regressionsgerade mit Regressionskoeffizienten (R^2) und Formel bezieht sich auf die Kontrollen (grau)	174
Abbildung 5.19: Zusammenhang zwischen Tageslichtsumme und dem Kaliumgehalt [mg g^{-1} TM] von <i>P. odorata</i> , kultiviert in der Klimakammer; Dargestellt sind Einzelwerte der Varianten (n=4); grau: FL, blau: FL+B, grün: FL+G, rot: FL+R, lila: FL+PL, dunkelrot: FL+HMG; Regressionsgerade mit Regressionskoeffizienten (R^2) und Formel bezieht sich auf die Kontrollen (grau)	178
Abbildung 5.20: Zusammenhang zwischen Wassergehalt und dem Kaliumgehalt [mg g^{-1} TM] von <i>P. odorata</i> im Gewächshaus. grau: FL, blau: FL+B, grün: FL+G, rot: FL+R, lila: FL+PL, dunkelrot: FL+HMG; Linie: Regressionsgerade mit Regressionskoeffizienten (R^2) und Formel, Pearsonscher Korrelationskoeffizient für den Zusammenhang: $r=0,78$	180
Abbildung 5.21: Zusammenhang zwischen PAR-Wert und dem Magnesiumgehalt [mg g^{-1} TM] von <i>P. odorata</i> , kultiviert in der Klimakammer; Dargestellt sind Einzelwerte der Varianten (n=4); grau: FL, blau: FL+B, grün: FL+G, rot: FL+R, lila: FL+PL, dunkelrot: FL+HMG; Regressionsgerade mit Regressionskoeffizienten (R^2) und Formel bezieht sich auf die Kontrollen (grau).....	182
Abbildung 5.22: Zusammenhang zwischen Tageslichtsumme und dem Calciumgehalt [$\mu\text{g g}^{-1}$ TM] von <i>P. odorata</i> , kultiviert in der Klimakammer; Dargestellt sind Einzelwerte der Varianten (n=4); grau: FL, blau: FL+B, grün: FL+G, rot: FL+R, lila: FL+PL, dunkelrot: FL+HMG; Regressionsgerade mit Regressionskoeffizienten (R^2) und Formel bezieht sich auf die Kontrollen (grau)	186
Abbildung 5.23: Zusammenhang zwischen Tageslichtsumme und dem Eisengehalt [mg g^{-1} TM] von <i>P. odorata</i> , kultiviert in der Klimakammer. Dargestellt sind Einzelwerte der Varianten (n=4); grau: FL, blau: FL+B, grün: FL+G, rot: FL+R, lila: FL+PL, dunkelrot: FL+HMG; Regressionsgerade mit Regressionskoeffizienten (R^2) und Formel bezieht sich auf die Kontrollen (grau).....	191
Abbildung 5.24 a-d: Beeinflussung des Wachstums von <i>P. odorata</i> durch zusätzliche Bestrahlungen mit LEDs im Gewächshaus (Versuchsreihe „GwH13“)	194
Abbildung 5.25: Beeinflussung des Wachstums von <i>P. odorata</i> durch zusätzliche Bestrahlungen mit LEDs, kultiviert in der Klimakammer mit Leuchtstoffröhren; FL+R= Ergänzung der Grundbelichtung durch rote LEDs (zugehörige Kontrolle: FLr), FL+G= Ergänzung der Grundbelichtung durch grüne LEDs (zugehörige Kontrolle: FLg), FL+B= Ergänzung der Grundbelichtung durch blaue LEDs (zugehörige Kontrolle: FLb); dargestellt ist das wöchentliche Längenwachstum; unterschiedliche Buchstaben bezeichnen signifikante Unterschiede der Trieb länge nach drei Wochen zwischen LED-Variante und zugehöriger Kontrolle (Tukey-test, $P \leq 0.05$), n=16 (FL+B), n=20 (FL+G, FL+R)	195
Abbildung 5.26: Zusammenhang zwischen durchschnittlicher Tageslichtsumme und Trieb länge [cm] der Kontrollen im Gewächshaus; Quadrate: „GwH13“, Kreise: „GwH14“, Rauten: „GwH14, nachts“, Dreiecke: „GwH14, 24h“; Regressionsgerade mit Regressionskoeffizienten (R^2) und Formel bezieht sich auf die Kontrollen (grau)	196

Abbildung 5.27 a-d: Beeinflussung des Triebblängenwachstums von <i>P. odorata</i> durch zusätzliche Bestrahlungen mit LEDs (B=Blau, G=Grün, R=Rot), kultiviert im Gewächshaus mit natürlichem Licht; dargestellt ist das wöchentliche Längenwachstum; unterschiedliche Buchstaben bezeichnen signifikante Unterschiede zwischen Behandlungen (Tukey-test, $P \leq 0.05$), n=12 („GwH13“), n=18 („GwH14“, „GwH14, nachts“, „GwH14, 24 h“).	197
Abbildung 5.28: Beeinflussung des Wachstum von <i>P. odorata</i> (Versuchsreihe „KK13“) durch Überdeckung mit photoselktiven Folien; abgebildet sind Pflanzen, gewachsen unter photoselktiven Folien („PL40%“= Überdeckung der Pflanzen mit der Pale Lavander-Folie, erreichte Lichtintensität: 40% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLp2) bzw. „HMG72%“= Überdeckung der Pflanzen mit der Half Minus Green-Folie, erreichte Lichtintensität: 72% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLh1)) und zum Vergleich Pflanzen der zugehörigen Kontrollbedingungen.	198
Abbildung 5.29: Beeinflussung des Triebwachstums von <i>P. odorata</i> im in der Klimakammer durch Überdeckung mit photoselktiven Folien (FL+HMG72%= Überdeckung der Pflanzen mit der Half Minus Green-Folie, erreichte Lichtintensität: 72% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLh1), FL+PL57%= Überdeckung der Pflanzen mit der Pale Lavander-Folie, erreichte Lichtintensität: 57% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLp1), FL+HMG55%= Überdeckung der Pflanzen mit der Half Minus Green-Folie, erreichte Lichtintensität: 55% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLh2), FL+PL40%= Überdeckung der Pflanzen mit der Pale Lavander-Folie, erreichte Lichtintensität: 40% im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLp2)): kultiviert im Klimaschrank mit Leuchtstoffröhren; dargestellt ist das wöchentliche Längenwachstum; unterschiedliche Buchstaben bezeichnen signifikante Unterschiede der Triebblänge nach drei Wochen zwischen Folien-Variante und zugehöriger Kontrolle (Tukey-test, $P \leq 0.05$), n=16 (FL+PL57%), n=20 (FL+HMG72%, FL+HMG55%, FL+PL40%).	199
Abbildung 5.30 a-c: Beeinflussung des Wachstums von <i>P. odorata</i> durch Überdeckung mit photoselktiven Folien im Gewächshaus: NL= Natürliches Licht (=Kontrolle), NL-HMG= Überdeckung mit Half Minus Green-Folie, NL-PL= Überdeckung mit Pale Lavander-Folie (Versuchsreihe „GwH13“).	199
Abbildung 5.31 a, b: Beeinflussung der Triebblänge von <i>P. odorata</i> durch Überdeckung mit photoselktiven Folien (NL= Natürliches Licht (=Kontrolle), NL-HMG= Überdeckung mit Half Minus Green-Folie, NL-PL= Überdeckung mit Pale Lavander-Folie): kultiviert im Gewächshaus mit natürlichem Licht; dargestellt ist das wöchentliche Längenwachstum; unterschiedliche Buchstaben bezeichnen signifikante Unterschiede zwischen Behandlungen (Tukey-test, $P \leq 0.05$), n=12 („GwH13“), n=18 („GwH14“).	200
Abbildung 5.32: Zusammenhang zwischen Tageslichtsumme und dem Triebwachstum in der Klimakammer; Unterschiede der Lichtzusammensetzung nicht berücksichtigt. grau: FL, blau: FL+B, grün: FL+G, rot: FL+R, lila: FL+PL, dunkelrot: FL+HMG; Regressionsgerade mit Regressionskoeffizienten (R^2) und Formel bezieht sich auf die Kontrollen (grau).	200
Abbildung 5.33: Zusammenhang zwischen Tageslichtsumme und Frischmasse [g/ Pflanze] in der Klimakammer; Unterschiede der Lichtzusammensetzung nicht berücksichtigt. grau: FL, blau: FL+B, grün: FL+G, rot: FL+R, lila: FL+PL, dunkelrot: FL+HMG; Regressionsgerade mit Regressionskoeffizienten (R^2) und Formel bezieht sich auf die Kontrollen (grau).	205
Abbildung 5.34: Zusammenhang zwischen Tageslichtsumme und der Blattmasse in der Klimakammer; Unterschiede der Lichtzusammensetzung nicht berücksichtigt. grau: FL, blau: FL+B, grün: FL+G, rot: FL+R, lila: FL+PL, dunkelrot: FL+HMG; Regressionsgerade mit Regressionskoeffizienten (R^2) und Formel bezieht sich auf die Kontrollen (grau).	206
Abbildung 5.35: Zusammenhang zwischen Tageslichtsumme und Blatt:Frischmasse in der Klimakammer; Unterschiede der Lichtzusammensetzung nicht berücksichtigt. grau: FL, blau: FL+B, grün: FL+G, rot: FL+R, lila: FL+PL, dunkelrot: FL+HMG; Regressionsgerade mit Regressionskoeffizienten (R^2) und Formel bezieht sich auf die Kontrollen (grau).	206
Abbildung 5.36: Zusammenhang zwischen Tageslichtsumme und der Trockenmasse [g/ Pflanze] in der Klimakammer; Unterschiede der Lichtzusammensetzung nicht berücksichtigt. Grau: FL, blau: FL+B, grün: FL+G, rot: FL+R, lila: FL+PL, dunkelrot: FL+HMG; Regressionsgerade mit Regressionskoeffizienten (R^2) und Formel bezieht sich auf die Kontrollen (grau).	207
Abbildung 5.37: Zusammenhang zwischen Tageslichtsumme und dem Trockenmassegehalt [%] in der Klimakammer; Unterschiede der Lichtzusammensetzung nicht berücksichtigt. Grau: FL, blau:	

FL+B, grün: FL+G, rot: FL+R, lila: FL+PL, dunkelrot: FL+HMG; Regressionsgerade mit Regressionskoeffizienten (R^2) und Formel bezieht sich auf die Kontrollen (grau).....	207
Abbildung 5.38: Zusammenhang zwischen durchschnittlicher Tageslichtsumme und Frischmasse [g/ Pflanze] der Versuchsreihen im Gewächshaus; Quadrate: „GwH13“, Kreise: „GwH14“, Rauten: „GwH14, nachts“, Dreiecke: „GwH14, 24h“; Regressionsgerade mit Regressionskoeffizienten (R^2) und Formel bezieht sich auf die Kontrollen (grau)	211
Abbildung 5.39: Zusammenhang zwischen durchschnittlicher Tageslichtsumme und Blattmasse [g/ Pflanze] der Kontrollen im Gewächshaus; Quadrate: „GwH13“, Kreise: „GwH14“, Rauten: „GwH14, nachts“, Dreiecke: „GwH14, 24h“; Regressionsgerade mit Regressionskoeffizienten (R^2) und Formel bezieht sich auf die Kontrollen (grau)	212
Abbildung 5.40: Zusammenhang zwischen durchschnittlicher Tageslichtsumme und Trockenmasse [g/ Pflanze] der Kontrollen im Gewächshaus; grau: „GwH13“, lila: „GwH14“, blau: „GwH14, nachts“, grün: „GwH14, 24h“; Regressionsgerade mit Regressionskoeffizienten (R^2) und Formel bezieht sich auf die Kontrollen (grau)	212
Abbildung 5.41: Zusammenhang zwischen durchschnittlicher Tageslichtsumme und Blatt:Frischmasse-Verhältnis der Versuchsreihen im Gewächshaus; Quadrate: „GwH13“, Kreise: „GwH14“, Rauten: „GwH14, nachts“, Dreiecke: „GwH14, 24h“; Regressionsgerade mit Regressionskoeffizienten (R^2) und Formel bezieht sich auf die Kontrollen (grau).....	213
Abbildung 5.42: Zusammenhang zwischen durchschnittlicher Tageslichtsumme und Trockenmassegehalt [%] der Kontrollen im Gewächshaus; grau: „GwH13“, lila: „GwH14“, blau: „GwH14, nachts“, grün: „GwH14, 24h“; Regressionsgerade mit Regressionskoeffizienten (R^2) und Formel bezieht sich auf die Kontrollen (grau)	214
Abbildung 5.43 a,b: Zusammenhang der Frischmasse [g/ Pflanze] mit der Tageslichtsumme (links, a). Versuchsreihe „GwH14, 24h“. Dargestellte Varianten: grau= NL, grün= NL+G, blau= NL+B, rot= NL+R; Rechts: Zusammenhang der Frischmasse [g/ Pflanze] mit dem Rang bezüglich der Tageslichtsumme (b)	217
Abbildung 6.1: Hauptkomponentenanalyse mit den Ergebnissen aus den Klimakammerversuchen: TL (=Trieblänge), FM (=Frischmasse), BM (=Blattmasse), TM (=Trockenmasse), TM_ (=Trockenmasse-gehalt), BMFM (=Blatt:Frish-masse), AA (=Ascorbinsäure), CAR (=Carotinoide), PP (=Polyphenole), AOX (=Antioxidative Kapazität), FLAV (=Flavonoide), CA (=Calcium), FE (=Eisen), K (=Kalium), MG (=Magnesium), P (=Phosphor), N (=Nitrat); um den Einfluss des PAR-Wertes herauszurechnen, beziehen sich die Gehalte/ Wachstumsparameter der LED-/Folienvarianten auf die zugehörige Kontrolle [%]. Pfeile deuten die Beeinflussung (positiv bzw. negativ) der einzelnen Untersuchungsparameter durch die spektrale Lichtzusammensetzung an: blau (blaue LEDs/ kurzwelliger Blaulichtanteil); grün (grüne LEDs/ kurzwelliger Grünlichtanteil); rot (rote LEDs/ kurzwelliger Rotlichtanteil); ↑ Beeinflussung durch HMG; ↑ Beeinflussung durch PL.....	226
Abbildung 6.2: Hauptkomponentenanalysen: „GwH13“(a), „GwH14“ (b), „GwH14, nachts (c), „GwH14, 24h“ (d); TL (=Trieblänge), FM (=Frischmasse), BM (=Blattmasse), TM (=Trockenmasse), TM_ (=Trockenmassegehalt), BMFM (=Blatt:Frishmasse), AA (=Ascorbinsäure), CAR (=Carotinoide), PP (=Polyphenole), AOX (=antioxidative Kapazität), FLAV (=Flavonoide), CA (=Calcium), FE (=Eisen), K (=Kalium), MG (=Magnesium), P (=Phosphor), N (=Nitrat); Pfeile deuten die Beeinflussung (positiv bzw. negativ) der einzelnen Untersuchungsparameter durch die spektrale Lichtzusammensetzung an: blau (blaue LEDs/ kurzwelliger Blaulichtanteil); grün (grüne LEDs/ kurzwelliger Grünlichtanteil); rot (rote LEDs/ kurzwelliger Rotlichtanteil); ↑ Beeinflussung durch HMG; ↑ Beeinflussung durch PL (eine größere Ansicht der Hauptkomponentenanalysen finden sich im Anhang 7).....	227

11. TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 2.1: Annahmen für die Berechnung der empfohlenen Vitamin A-Aufnahmemengen der WHO/FAO und EFSA	70
Tabelle 4.1: Spezifikation des verwendeten Substrates „Gramoflor Profi Substrat“	92
Tabelle 4.2: Zusammensetzung der Basisnährlösung	92
Tabelle 4.3: Mittlere PAR-Werte der Kontrollbeleuchtung, gemessen 20 cm über dem Boden, jeweils am ersten Tag des Versuchszeitraums (Leuchtstoffröhren ohne LEDs oder lichtmodifizierenden Folien) bei den einzelnen Versuchsreihen, gemessen mit dem Chlorophyll Fluorimeter PAM-2000.....	94
Tabelle 4.4: spektrale Lichtzusammensetzung im Freiland vs. Gewächshaus (GwH) ohne und mit Energieschirm; gemessen am 06.08.2018 um 12:30 Uhr mit dem SpectraWiz Spectroradiometer PS-100; Witterung: sonnig.....	96
Tabelle 4.5: Überblick über die Versuchsreihen im Gewächshaus.....	96
Tabelle 4.6: mittlere PAR-Werte [$\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$] im Gewächshaus (Messgerät: Chlorophyll Fluorimeter PAM-2000), gemessen zu drei Tageszeiten und Sonnenscheinstunden (gesamt und gemittelt) während der Versuchszeiträume:	97
Tabelle 4.7: Mittlere Luftfeuchtigkeiten bei Tag und Nacht während der Versuchsräume „GwH13“, „GwH14“, „GwH14, nachts“ und „GwH14, 24 h“ im Gewächshaus	101
Tabelle 4.8: Vergleich der spektralen Lichtzusammensetzung in der Klimakammer ohne und mit LEDs (blau, grün, rot); gemessen mit dem AvantesAvaSpec NIR 256 Spektrometer.....	103
Tabelle 4.9: Vergleich der spektralen Lichtzusammensetzung in der Klimakammer von Varianten ohne Folie mit den Varianten mit Folien (HMG=Half Minus Green 248, PL= Pale Lavander 136); gemessen mit dem AvantesAvaSpec NIR 256 Spektrometer	106
Tabelle 4.10: gemessene Temperaturen und Luftfeuchtigkeiten auf Pflanzenhöhe ohne und mit Folien, gemessen zu drei Tageszeiten; gemessen mit dem Conrad Voltcraft HT-100 Thermo-/ Hygrometer	107
Tabelle 4.11: Veränderung der spektralen Lichtzusammensetzung im Gewächshaus durch die Folien Half Minus Green 248 und Pale Lavander 136 im Vergleich zum natürlichen Licht im Gewächshaus ohne Folie (=100%); gemessen mit dem SpectraWiz Spectroradiometer PS-100	108
Tabelle 5.1: Beeinflussung des Ascorbinsäuregehalts [$\text{mg } 100 \text{ g}^{-1} \text{ FM}$] von <i>P. odorata</i> durch eine Zusatzbestrahlung mit LEDs: nach drei Wochen, kultiviert in der Klimakammer (Versuchsjahr 2013) unter kontrollierten Bedingungen; beschrieben werden die Gehalte in den LED-Varianten im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle.....	120
Tabelle 5.2: Beeinflussung des Ascorbinsäuregehalts [$\text{mg } 100 \text{ g}^{-1} \text{ FM}$] von <i>P. odorata</i> durch eine Zusatzbestrahlung mit LEDs (B=Blau, G=Grün, R=Rot): kultiviert im Gewächshaus mit natürlichem Licht; beschrieben werden die Gehalte in den LED-Varianten (NL+B, NL+G, NL+R) im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (NL).....	122
Tabelle 5.3: Beeinflussung des Ascorbinsäuregehalts [$\text{mg } 100 \text{ g}^{-1} \text{ FM}$] von <i>P. odorata</i> durch eine Überdeckung mit photoselktiven Folien: nach drei Wochen, kultiviert in der Klimakammer (Versuchsjahr 2013) unter kontrollierten Bedingungen; beschrieben werden die Gehalte in den Folien-Varianten im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle	123
Tabelle 5.4: Beeinflussung des Ascorbinsäuregehalt [$\text{mg } 100 \text{ g}^{-1} \text{ FM}$] von <i>P. odorata</i> durch eine Überdeckung mit photoselktiven Folien (HMG=Half Minus Green, PL=Pale Lavander): nach drei Wochen, kultiviert im Gewächshaus mit natürlichem Licht; beschrieben werden die Gehalte in den LED-Varianten (NL+B, NL+G, NL+R) im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (NL).....	123
Tabelle 5.5: Zusammenhang zwischen Lichteigenschaften und dem Ascorbinsäuregehalt in <i>P. odorata</i> , kultiviert in der Klimakammer bzw. im Gewächshaus mit Lichtmodifikationen durch zusätzliche LED-Beleuchtung oder photoselktive Folien; angegeben sind partielle Korrelationskoeffizienten nach Spearman (LED-Versuche im Gewächshaus) bzw. nach Pearson (LED-Versuche in der Klimakammer; Folien-Versuche in der Klimakammer und im Gewächshaus)	125
Tabelle 5.6: Beeinflussung des Carotinoidgehalts [$\text{mg } 100 \text{ g}^{-1} \text{ FM}$] von <i>P. odorata</i> durch eine Zusatzbestrahlung mit LEDs: nach drei Wochen, kultiviert in der Klimakammer (Versuchsjahr 2013) unter kontrollierten Bedingungen; beschrieben werden die Gehalte in den LED-Varianten im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle.....	128

Tabelle 5.7: Beeinflussung des Carotinoidgehalts [mg 100 g ⁻¹ FM] von <i>P. odorata</i> durch eine Zusatzbestrahlung mit LEDs (B=Blau, G=Grün, R=Rot): kultiviert im Gewächshaus mit natürlichen Licht; beschrieben werden die Gehalte in den LED-Varianten (NL+B, NL+G, NL+R) im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (NL).....	129
Tabelle 5.8: Beeinflussung des Carotinoidgehalts [mg 100 g ⁻¹ FM] von <i>P. odorata</i> durch eine Überdeckung mit photoselektiven Folien: nach drei Wochen, kultiviert in der Klimakammer (Versuchsjahr 2013) unter kontrollierten Bedingungen; beschrieben werden die Gehalte in den Folien-Varianten im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle	130
Tabelle 5.9: Beeinflussung des Carotinoidgehalts [mg 100 g ⁻¹ FM] von <i>P. odorata</i> durch eine Überdeckung mit photoselektiven Folien (HMG=Half Minus Green, PL=Pale Lavander): nach drei Wochen, kultiviert im Gewächshaus mit natürlichen Licht; beschrieben werden die Gehalte in den LED-Varianten (NL+B, NL+G, NL+R) im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (NL).....	130
Tabelle 5.10: Zusammenhang zwischen Lichteigenschaften und dem Carotinoidgehalt in <i>P. odorata</i> , kultiviert in der Klimakammer bzw. im Gewächshaus mit Lichtmodifikationen durch zusätzliche LED-Beleuchtung oder photoselektive Folien; angegeben sind partielle Korrelationskoeffizienten nach Spearman (LED-Versuche im Gewächshaus) bzw. nach Pearson (LED-Versuche in der Klimakammer; Folien-Versuche in der Klimakammer und im Gewächshaus).....	132
Tabelle 5.11: Beeinflussung des Polyphenolgehalts [mg 100 g ⁻¹ FM] von <i>P. odorata</i> durch eine Zusatzbestrahlung mit LEDs: nach drei Wochen, kultiviert in der Klimakammer (Versuchsjahr 2013) unter kontrollierten Bedingungen; beschrieben werden die Gehalte in den LED-Varianten im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle.....	135
Tabelle 5.12: Beeinflussung des Polyphenolgehalts [mg 100 g ⁻¹ FM] von <i>P. odorata</i> durch eine Zusatzbestrahlung mit LEDs (B=Blau, G=Grün, R=Rot): kultiviert im Gewächshaus mit natürlichen Licht; beschrieben werden die Gehalte in den LED-Varianten (NL+B, NL+G, NL+R) im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (NL).....	137
Tabelle 5.13: Beeinflussung des Polyphenolgehalts [mg 100 g ⁻¹ FM] von <i>P. odorata</i> durch eine Überdeckung mit photoselektiven Folien: nach drei Wochen, kultiviert in der Klimakammer (Versuchsjahr 2013) unter kontrollierten Bedingungen; beschrieben werden die Gehalte in den Folien-Varianten im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle	137
Tabelle 5.14: Beeinflussung des Polyphenolgehalts [mg 100 g ⁻¹ FM] von <i>P. odorata</i> durch eine Überdeckung mit photoselektiven Folien (HMG=Half Minus Green, PL=Pale Lavander): nach drei Wochen, kultiviert im Gewächshaus mit natürlichen Licht; beschrieben werden die Gehalte in den LED-Varianten (NL+B, NL+G, NL+R) im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (NL).....	138
Tabelle 5.15: Zusammenhang zwischen Lichteigenschaften und dem Polyphenolgehalt in <i>P. odorata</i> , kultiviert in der Klimakammer bzw. im Gewächshaus mit Lichtmodifikationen durch zusätzliche LED-Beleuchtung oder photoselektive Folien; angegeben sind partielle Korrelationskoeffizienten nach Spearman (LED-Versuche im Gewächshaus) bzw. nach Pearson (LED-Versuche in der Klimakammer; Folien-Versuche in der Klimakammer und im Gewächshaus).....	139
Tabelle 5.16: Beeinflussung antioxidativen Kapazität [mg TEAC 100 g ⁻¹ FM] von <i>P. odorata</i> durch eine Zusatzbestrahlung mit LEDs: nach drei Wochen, kultiviert in der Klimakammer (Versuchsjahr 2013) unter kontrollierten Bedingungen; beschrieben werden die Gehalte in den LED-Varianten im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle	144
Tabelle 5.17: Beeinflussung der antioxidativen Kapazität [mg TEAC 100 g ⁻¹ FM] von <i>P. odorata</i> durch eine Zusatzbestrahlung mit LEDs (B=Blau, G=Grün, R=Rot): kultiviert im Gewächshaus mit natürlichen Licht; beschrieben werden die Gehalte in den LED-Varianten (NL+B, NL+G, NL+R) im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (NL).....	146
Tabelle 5.18: Beeinflussung der Antioxidativen Kapazität [mg TEAC 100 g ⁻¹ FM] von <i>P. odorata</i> durch eine Überdeckung mit photoselektiven Folien: nach drei Wochen, kultiviert in der Klimakammer (Versuchsjahr 2013) unter kontrollierten Bedingungen; beschrieben werden die Gehalte in den Folien-Varianten im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle	147
Tabelle 5.19: Beeinflussung der antioxidativen Kapazität [mg TEAC 100 g ⁻¹ FM] von <i>P. odorata</i> durch eine Überdeckung mit photoselektiven Folien (HMG=Half Minus Green, PL=Pale Lavander): nach drei Wochen, kultiviert im Gewächshaus mit natürlichen Licht; beschrieben werden die Gehalte in den LED-Varianten (NL+B, NL+G, NL+R) im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (NL).....	148
Tabelle 5.20: Zusammenhang zwischen Lichteigenschaften und der antioxidativen Kapazität in <i>P. odorata</i> , kultiviert in der Klimakammer bzw. im Gewächshaus mit Lichtmodifikationen durch	

zusätzliche LED-Beleuchtung oder photoselektive Folien; angegeben sind partielle Korrelationskoeffizienten nach Spearman (LED-Versuche im Gewächshaus) bzw. nach Pearson (LED-Versuche in der Klimakammer; Folien-Versuche in der Klimakammer und im Gewächshaus)	149
Tabelle 5.21: Beeinflussung des Flavonoidgehalts [mg 100 g ⁻¹ FM] von <i>P. odorata</i> durch eine Zusatzbestrahlung mit LEDs: nach drei Wochen, kultiviert in der Klimakammer (Versuchsjahr 2013) unter kontrollierten Bedingungen; beschrieben werden die Gehalte in den LED-Varianten im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle.....	154
Tabelle 5.22: Beeinflussung des Flavonoidgehalts [mg 100 g ⁻¹ FM] von <i>P. odorata</i> durch eine Zusatzbestrahlung mit LEDs (B=Blau, G=Grün, R=Rot): kultiviert im Gewächshaus mit natürlichen Licht; beschrieben werden die Gehalte in den LED-Varianten (NL+B, NL+G, NL+R) im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (NL).....	156
Tabelle 5.23: Beeinflussung des Flavonoidgehalts [mg 100 g ⁻¹ FM] von <i>P. odorata</i> durch eine Überdeckung mit photoselektiven Folien: nach drei Wochen, kultiviert in der Klimakammer (Versuchsjahr 2013) unter kontrollierten Bedingungen; beschrieben werden die Gehalte in den Folien-Varianten im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle	157
Tabelle 5.24: Beeinflussung des Flavonoidgehalts [mg 100 g ⁻¹ FM] von <i>P. odorata</i> durch eine Überdeckung mit photoselektiven Folien (HMG=Half Minus Green, PL=Pale Lavander): nach drei Wochen, kultiviert im Gewächshaus mit natürlichen Licht; beschrieben werden die Gehalte in den LED-Varianten (NL+B, NL+G, NL+R) im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (NL).....	157
Tabelle 5.25: Zusammenhang zwischen Lichteigenschaften und dem Flavonoidgehalt in <i>P. odorata</i> , kultiviert in der Klimakammer bzw. im Gewächshaus mit Lichtmodifikationen durch zusätzliche LED-Beleuchtung oder photoselektive Folien; angegeben sind partielle Korrelationskoeffizienten nach Spearman (LED-Versuche im Gewächshaus) bzw. nach Pearson (LED-Versuche in der Klimakammer; Folien-Versuche in der Klimakammer und im Gewächshaus).....	159
Tabelle 5.26: Beeinflussung des Anthocyangehalts [mg 100 g ⁻¹ FM] von <i>P. odorata</i> durch eine Zusatzbestrahlung mit LEDs (B=Blau, G=Grün, R=Rot): kultiviert im Gewächshaus mit natürlichen Licht; beschrieben werden die Gehalte in den LED-Varianten (NL+B, NL+G, NL+R) im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (NL).....	162
Tabelle 5.27: Beeinflussung des Anthocyangehalts [mg 100 g ⁻¹ FM] von <i>P. odorata</i> durch eine Überdeckung mit photoselektiven Folien (HMG=Half Minus Green, PL=Pale Lavander): nach drei Wochen, kultiviert im Gewächshaus mit natürlichen Licht; beschrieben werden die Gehalte in den LED-Varianten (NL+B, NL+G, NL+R) im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (NL).....	163
Tabelle 5.28: Zusammenhang zwischen Lichteigenschaften und dem Anthocyangehalt in <i>P. odorata</i> , kultiviert in der Klimakammer bzw. im Gewächshaus mit Lichtmodifikationen durch zusätzliche LED-Beleuchtung oder photoselektive Folien; angegeben sind partielle Korrelationskoeffizienten nach Spearman (LED-Versuche im Gewächshaus) bzw. nach Pearson (LED-Versuche in der Klimakammer; Folien-Versuche in der Klimakammer und im Gewächshaus).....	163
Tabelle 5.29: Zusammenhang zwischen Mineralstoffgehalten (N=Nitrat, P=Phosphor, K=Kalium, Mg=Magnesium, Ca=Calcium, Fe=Eisen) und dem Nährlösungsverbrauch bzw. der Trockenmasse für die Versuchsreihen „KK13“ und „GwH13“ in <i>P. odorata</i> , kultiviert in der Klimakammer bzw. im Gewächshaus mit Lichtmodifikationen durch zusätzliche LED-Beleuchtung oder photoselektive Folien; angegeben sind Korrelationskoeffizienten nach Pearson	166
Tabelle 5.30: Beeinflussung des Nitratgehalts [mg g ⁻¹ TM] von <i>P. odorata</i> durch LEDs: nach drei Wochen, kultiviert in der Klimakammer (Versuchsjahr 2013) unter kontrollierten Bedingungen; beschrieben werden die Gehalte in den LED-Varianten im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle	168
Tabelle 5.31: Beeinflussung des Nitratgehalts [mg g ⁻¹ TM] von <i>P. odorata</i> durch eine Überdeckung mit photoselektiven Folien: nach drei Wochen, kultiviert in der Klimakammer (Versuchsjahr 2013) unter kontrollierten Bedingungen; beschrieben werden die Gehalte in den Folien-Varianten im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle	168
Tabelle 5.32: Beeinflussung des Nitratgehalts [mg g ⁻¹ TM] von <i>P. odorata</i> durch eine Zusatzbestrahlung mit LEDs (B=Blau, G=Grün, R=Rot) bzw. eine Überdeckung mit photoselektiven Folien (HMG= „Half minus green“-Folie; PL= „Pale Lavander“-Folie): nach drei Wochen, kultiviert im Gewächshaus (Versuchsreihe „GwH13“) mit natürlichen Licht.....	169
Tabelle 5.33: Zusammenhang zwischen Lichteigenschaften und dem Nitratgehalt in <i>P. odorata</i> , kultiviert in der Klimakammer bzw. im Gewächshaus mit Lichtmodifikationen durch zusätzliche LED-Beleuchtung oder photoselektive Folien; angegeben sind partielle Korrelationskoeffizienten nach	

Spearman (LED-Versuche im Gewächshaus) bzw. nach Pearson (LED-Versuche in der Klimakammer; Folien-Versuche in der Klimakammer und im Gewächshaus); die gemittelten Korrelationskoeffizienten wurden nach Fisher-Z-Transformation berechnet und zurücktransformiert	170
Tabelle 5.34: Beeinflussung des Phosphorgehalts [mg g^{-1} TM] von <i>P. odorata</i> durch eine Zusatzbestrahlung mit LEDs: nach drei Wochen, kultiviert in der Klimakammer (Versuchsjahr 2013) unter kontrollierten Bedingungen; beschrieben werden die Gehalte in den LED-Varianten im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle.....	173
Tabelle 5.35: Beeinflussung des Phosphorgehalts [mg g^{-1} TM] von <i>P. odorata</i> durch eine Überdeckung mit photoselektiven Folien: nach drei Wochen, kultiviert in der Klimakammer (Versuchsjahr 2013) unter kontrollierten Bedingungen; beschrieben werden die Gehalte in den Folien-Varianten im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle	174
Tabelle 5.36: Beeinflussung des Phosphorgehalts [mg g^{-1} TM] von <i>P. odorata</i> durch eine Zusatzbestrahlung mit LEDs (B=Blau, G=Grün, R=Rot) bzw. eine Überdeckung mit photoselektiven Folien (HMG= „Half minus green“-Folie; PL= „Pale Lavender“-Folie): nach drei Wochen, kultiviert im Gewächshaus (Versuchsreihe „GwH13“) mit natürlichen Licht.....	175
Tabelle 5.37: Zusammenhang zwischen Lichteigenschaften und dem Phosphorgehalt in <i>P. odorata</i> , kultiviert in der Klimakammer bzw. im Gewächshaus mit Lichtmodifikationen durch zusätzliche LED-Beleuchtung oder photoselektive Folien; angegeben sind partielle Korrelationskoeffizienten nach Spearman (LED-Versuche im Gewächshaus) bzw. nach Pearson (LED-Versuche in der Klimakammer; Folien-Versuche in der Klimakammer und im Gewächshaus); die gemittelten Korrelationskoeffizienten wurden nach Fisher-Z-Transformation berechnet und zurücktransformiert	175
Tabelle 5.38: Beeinflussung des Kaliumgehalts [mg g^{-1} TM] von <i>P. odorata</i> durch eine Zusatzbestrahlung mit LEDs: nach drei Wochen, kultiviert in der Klimakammer (Versuchsjahr 2013) unter kontrollierten Bedingungen; beschrieben werden die Gehalte in den LED-Varianten im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle.....	177
Tabelle 5.39: Beeinflussung des Kaliumgehalts [mg g^{-1} TM] von <i>P. odorata</i> durch eine Überdeckung mit photoselektiven Folien: nach drei Wochen, kultiviert in der Klimakammer (Versuchsjahr 2013) unter kontrollierten Bedingungen; beschrieben werden die Gehalte in den Folien-Varianten im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle	177
Tabelle 5.40: Beeinflussung des Kaliumgehalts [mg g^{-1} TM] von <i>P. odorata</i> durch eine Zusatzbestrahlung mit LEDs (B=Blau, G=Grün, R=Rot) bzw. eine Überdeckung mit photoselektiven Folien (HMG= „Half minus green“-Folie; PL= „Pale Lavender“-Folie): nach drei Wochen, kultiviert im Gewächshaus (Versuchsreihe „GwH13“) mit natürlichen Licht.....	178
Tabelle 5.41: Zusammenhang zwischen Lichteigenschaften und dem Kaliumgehalt in <i>P. odorata</i> , kultiviert in der Klimakammer bzw. im Gewächshaus mit Lichtmodifikationen durch zusätzliche LED-Beleuchtung oder photoselektive Folien; angegeben sind partielle Korrelationskoeffizienten nach Spearman (LED-Versuche im Gewächshaus) bzw. nach Pearson (LED-Versuche in der Klimakammer; Folien-Versuche in der Klimakammer und im Gewächshaus); die gemittelten Korrelationskoeffizienten wurden nach Fisher-Z-Transformation berechnet und zurücktransformiert	179
Tabelle 5.42: Beeinflussung des Magnesiumgehalts [mg g^{-1} TM] von <i>P. odorata</i> durch eine Zusatzbestrahlung mit LEDs: nach drei Wochen, kultiviert in der Klimakammer (Versuchsjahr 2013) unter kontrollierten Bedingungen; beschrieben werden die Gehalte in den LED-Varianten im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle.....	181
Tabelle 5.43: Beeinflussung des Magnesiumgehalts [mg g^{-1} TM] von <i>P. odorata</i> durch eine Überdeckung mit photoselektiven Folien: nach drei Wochen, kultiviert in der Klimakammer (Versuchsjahr 2013) unter kontrollierten Bedingungen; beschrieben werden die Gehalte in den Folien-Varianten im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle	182
Tabelle 5.44: Beeinflussung des Magnesiumgehalts [mg g^{-1} TM] von <i>P. odorata</i> durch eine Zusatzbestrahlung mit LEDs (B=Blau, G=Grün, R=Rot) bzw. eine Überdeckung mit photoselektiven Folien (HMG= „Half minus green“-Folie; PL= „Pale Lavender“-Folie): nach drei Wochen, kultiviert im Gewächshaus (Versuchsreihe „GwH13“) mit natürlichen Licht.....	183
Tabelle 5.45: Zusammenhang zwischen Lichteigenschaften und dem Magnesiumgehalt in <i>P. odorata</i> , kultiviert in der Klimakammer bzw. im Gewächshaus mit Lichtmodifikationen durch zusätzliche LED-Beleuchtung oder photoselektive Folien; angegeben sind partielle Korrelationskoeffizienten nach Spearman (LED-Versuche im Gewächshaus) bzw. nach Pearson (LED-Versuche in der Klimakammer;	

Folien-Versuche in der Klimakammer und im Gewächshaus); die gemittelten Korrelationskoeffizienten wurden nach Fisher-Z-Transformation berechnet und zurücktransformiert	183
Tabelle 5.46: Beeinflussung des Calciumgehalts [mg g^{-1} TM] von <i>P. odorata</i> durch eine Zusatzbestrahlung mit LEDs: nach drei Wochen, kultiviert in der Klimakammer (Versuchsjahr 2013) unter kontrollierten Bedingungen; beschrieben werden die Gehalte in den LED-Varianten im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle.....	185
Tabelle 5.47: Beeinflussung des Calciumgehalts [mg g^{-1} TM] von <i>P. odorata</i> durch eine Überdeckung mit photoselktiven Folien: nach drei Wochen, kultiviert in der Klimakammer (Versuchsjahr 2013) unter kontrollierten Bedingungen; beschrieben werden die Gehalte in den Folien-Varianten im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle	186
Tabelle 5.48: Beeinflussung des Calciumgehalts [mg g^{-1} TM] von <i>P. odorata</i> durch eine Zusatzbestrahlung mit LEDs (B=Blau, G=Grün, R=Rot) bzw. eine Überdeckung mit photoselktiven Folien (HMG= „Half minus green“-Folie; PL= „Pale Lavander“-Folie): nach drei Wochen, kultiviert im Gewächshaus (Versuchsreihe „GwH13“) mit natürlichen Licht.....	187
Tabelle 5.49: Zusammenhang zwischen Lichteigenschaften und dem Calciumgehalt in <i>P. odorata</i> , kultiviert in der Klimakammer bzw. im Gewächshaus mit Lichtmodifikationen durch zusätzliche LED-Beleuchtung oder photoselktive Folien; angegeben sind partiale Korrelationskoeffizienten nach Spearman (LED-Versuche im Gewächshaus) bzw. nach Pearson (LED-Versuche in der Klimakammer; Folien-Versuche in der Klimakammer und im Gewächshaus); die gemittelten Korrelationskoeffizienten wurden nach Fisher-Z-Transformation berechnet und zurücktransformiert	187
Tabelle 5.50: Beeinflussung des Eisengehalts [mg g^{-1} TM] von <i>P. odorata</i> durch eine Zusatzbestrahlung mit LEDs: nach drei Wochen, kultiviert in der Klimakammer (Versuchsjahr 2013) unter kontrollierten Bedingungen; beschrieben werden die Gehalte in den LED-Varianten im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle.....	190
Tabelle 5.51: Beeinflussung des Eisengehalts [mg g^{-1} TM] von <i>P. odorata</i> durch eine Überdeckung mit photoselktiven Folien: nach drei Wochen, kultiviert in der Klimakammer (Versuchsjahr 2013) unter kontrollierten Bedingungen; beschrieben werden die Gehalte in den Folien-Varianten im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle	190
Tabelle 5.52: Beeinflussung des Eisengehalts [mg g^{-1} TM] von <i>P. odorata</i> durch eine Zusatzbestrahlung mit LEDs (B=Blau, G=Grün, R=Rot) bzw. eine Überdeckung mit photoselktiven Folien (HMG= „Half minus green“-Folie; PL= „Pale Lavander“-Folie): nach drei Wochen, kultiviert im Gewächshaus (Versuchsreihe „GwH13“) mit natürlichen Licht.....	191
Tabelle 5.53: Zusammenhang zwischen Lichteigenschaften und dem Eisengehalt in <i>P. odorata</i> , kultiviert in der Klimakammer bzw. im Gewächshaus mit Lichtmodifikationen durch zusätzliche LED-Beleuchtung oder photoselktive Folien; angegeben sind partiale Korrelationskoeffizienten nach Spearman (LED-Versuche im Gewächshaus) bzw. nach Pearson (LED-Versuche in der Klimakammer; Folien-Versuche in der Klimakammer und im Gewächshaus); die gemittelten Korrelationskoeffizienten wurden nach Fisher-Z-Transformation berechnet und zurücktransformiert	192
Tabelle 5.54: Zusammenhang zwischen Lichteigenschaften und dem Triebwachstum von <i>P. odorata</i> , kultiviert in der Klimakammer bzw. im Gewächshaus mit Lichtmodifikationen durch zusätzliche LED-Beleuchtung oder photoselktive Folien; angegeben sind partiale Korrelationskoeffizienten nach Spearman (LED-Versuche im Gewächshaus) bzw. nach Pearson (LED-Versuche in der Klimakammer; Folien-Versuche in der Klimakammer und im Gewächshaus).....	201
Tabelle 5.55: Beeinflussung der Biomasseakkumulierung von <i>P. odorata</i> durch zusätzliche LED-Beleuchtung (B=Blau, G=Grün, R=Rot): nach drei Wochen, kultiviert in der Klimakammer (Versuchsjahr 2013) unter kontrollierten Bedingungen (FM= Frischmasse; BM= Blattmasse; BM:FM= Blatt:Frischmasse-Verhältnis; TM= Trockenmasse; TM%= Trockenmassegehalt); beschrieben werden die Gehalte in den LED-Varianten (FL+B, FL+G, FL+R) im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle	203
Tabelle 5.56: Beeinflussung auf die Wachstumsparameter von <i>P. odorata</i> durch Überdeckung mit photoselktiven Folien: nach drei Wochen, kultiviert in der Klimakammer (Versuchsjahr 2013) unter kontrollierten Bedingungen (FM= Frischmasse; BM= Blattmasse; BM:FM= Blatt:Frischmasse-Verhältnis; TM= Trockenmasse; TM%= Trockenmassegehalt)	204
Tabelle 5.57: Beeinflussung der Biomasseakkumulierung von <i>P. odorata</i> durch zusätzliche LED-Beleuchtung (B=Blau, G=Grün, R=Rot): nach drei Wochen (FM= Frischmasse; BM= Blattmasse; BM:FM= Blatt:Frischmasse-Verhältnis; TM= Trockenmasse; TM%= Trockenmassegehalt)	208

Tabelle 5.58: Beeinflussung der Biomasseakkumulierung von <i>P. odorata</i> durch Überdeckung mit photoselektiver Folie (HMG=Half Minus Green, PL=Pale Lavander): nach drei Wochen (FM= Frischmasse; BM= Blattmasse; BM:FM= Blatt:Frischmasse-Verhältnis; TM= Trockenmasse; TM%= Trockenmassegehalt).....	209
Tabelle 6.1: Durchschnittliche Veränderungen von Inhaltsstoffen und Wachstumsparametern/ Biomassen [%] in der Klimakammer durch Erhöhungen der Tageslichtsumme um 1% (bezogen auf das gesamte Lichtspektrum oder Verstärkung bestimmter Spektralbereiche).....	223
Tabelle 6.2: Durchschnittliche Veränderungen von Inhaltsstoffen und Wachstumsparametern/ Biomassen [%] im Gewächshaus durch Erhöhungen der Tageslichtsumme um 1% (bezogen auf das gesamte Lichtspektrum oder Verstärkung bestimmter Spektralbereiche).....	224
Tabelle 12.1: Einfluss zusätzlicher LED-Beleuchtung (B=Blau, G=Grün, R=Rot) auf das Chlorophyll a:b-Verhältnis und Chlorophyll a+b/ Carotinoid-verhältnis von <i>P. odorata</i> nach drei Wochen, kultiviert im Gewächshaus mit natürlichen Licht; beschrieben werden die Gehalte in den LED-Varianten (NL+B, NL+G, NL+R) im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (NL).....	cxxxiii
Tabelle 12.2: Einfluss lichtmodifizierender Folien (HMG= „Half minus green“-Folie; PL= „Pale Lavander“-Folie) auf die Chlorophyll a- und b-gehalte [mg 100 g ⁻¹ FM] von <i>P. odorata</i> nach drei Wochen, kultiviert im Gewächshaus mit natürlichen Licht; beschrieben werden die Gehalte in den LED-Varianten (NL+B, NL+G, NL+R) im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (NL).....	cxxxiii
Tabelle 12.3: Einfluss lichtmodifizierender Folien (HMG= „Half minus green“-Folie; PL= „Pale Lavander“-Folie) auf das Chlorophyll a:b-Verhältnis und Chlorophyll a+b: Carotinoidverhältnis von <i>P. odorata</i> nach drei Wochen, kultiviert im Gewächshaus mit natürlichen Licht; beschrieben werden die Gehalte in den LED-Varianten (NL+B, NL+G, NL+R) im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (NL).....	cxxxiii
Tabelle 12.4: Einfluss einer zusätzlichen LED-Beleuchtung auf den Nährlösungsverbrauch (absolut und relativ, bezogen auf die zugehörige Kontrolle) von <i>P. odorata</i> , kultiviert in der Klimakammer; Versuchsreihe „KK13“.....	cxxxv
Tabelle 12.5: Einfluss einer zusätzlichen LED-Beleuchtung auf den Nährlösungsverbrauch (absolut und relativ, bezogen auf die zugehörige Kontrolle) von <i>P. odorata</i> nach drei Wochen, kultiviert im Gewächshaus mit natürlichem Licht.....	cxxxv
Tabelle 12.6: Korrelationsmatrix für Zusammenhänge zwischen Wachstumsparametern für die Versuchsreihe „KK13“ (LEDs).....	cxxxvi
Tabelle 12.7: Korrelationsmatrix für Zusammenhänge zwischen Wachstumsparametern für die Versuchsreihe „KK13“ (Folien).....	cxxxvi
Tabelle 12.8: Korrelationsmatrix für Zusammenhänge zwischen Wachstumsparametern für die Versuchsreihe „GwH13“ (LEDs).....	cxxxvi
Tabelle 12.9: Korrelationsmatrix für Zusammenhänge zwischen Wachstumsparametern für die Versuchsreihe „GwH13“ (Folien).....	cxxxvii
Tabelle 12.10: Korrelationsmatrix für Zusammenhänge zwischen Wachstumsparametern für die Versuchsreihe „GwH14“ (LEDs).....	cxxxvii
Tabelle 12.11: Korrelationsmatrix für Zusammenhänge zwischen Wachstumsparametern für die Versuchsreihe „GwH14“ (Folien).....	cxxxvii
Tabelle 12.12: Korrelationsmatrix für Zusammenhänge zwischen Wachstumsparametern für die Versuchsreihe „GwH14, nachts“ (LEDs).....	cxxxvii
Tabelle 12.13: Korrelationsmatrix für Zusammenhänge zwischen Wachstumsparametern für die Versuchsreihe „GwH14, 24h“ (LEDs).....	cxxxvii
Tabelle 12.14: Multiple Korrelationskoeffizienten (R ²) (TLS=Tageslichtsumme; TT=Tagestemperatur; NT=Nachttemperatur); berücksichtigt wurden jeweils die letzten drei Tage vor der Probenahme.....	cxxxviii
Tabelle 12.15: Multiple Korrelationskoeffizienten (R ²) (TLS=Tageslichtsumme; TT=Tagestemperatur; NT=Nachttemperatur; TLF=Tagesluftfeuchtigkeit; NLF=Nachtluftfeuchtigkeit); berücksichtigt wurde der gesamte Versuchszeitraum.....	cxxxviii
Tabelle 12.16: Zusammenhang zwischen Lichteigenschaften und der Frischmasse von <i>P. odorata</i> , kultiviert in der Klimakammer bzw. im Gewächshaus mit Lichtmodifikationen durch zusätzliche LED-Beleuchtung oder photoselektive Folien; angegeben sind partielle Korrelationskoeffizienten nach Spearman (LED-Versuche im Gewächshaus) bzw. nach Pearson (LED-Versuche in der Klimakammer; Folien-Versuche in der Klimakammer und im Gewächshaus).....	cxxxviii

Tabelle 12.17: Zusammenhang zwischen Lichteigenschaften und der Blattmasse von *P. odorata*, kultiviert in der Klimakammer bzw. im Gewächshaus mit Lichtmodifikationen durch zusätzliche LED-Beleuchtung oder photosensitive Folien; angegeben sind partielle Korrelationskoeffizienten nach Spearman (LED-Versuche im Gewächshaus) bzw. nach Pearson (LED-Versuche in der Klimakammer; Folien-Versuche in der Klimakammer und im Gewächshaus)..... cxxxix

Tabelle 12.18: Zusammenhang zwischen Lichteigenschaften und Blatt:Frishmasse-Verhältnis von *P. odorata*, kultiviert in der Klimakammer bzw. im Gewächshaus mit Lichtmodifikationen durch zusätzliche LED-Beleuchtung oder photosensitive Folien; angegeben sind partielle Korrelationskoeffizienten nach Spearman (LED-Versuche im Gewächshaus) bzw. nach Pearson (LED-Versuche in der Klimakammer; Folien-Versuche in der Klimakammer und im Gewächshaus) ... cxxxix

Tabelle 12.19: Zusammenhang zwischen Lichteigenschaften und der Trockenmasse von *P. odorata*, kultiviert in der Klimakammer bzw. im Gewächshaus mit Lichtmodifikationen durch zusätzliche LED-Beleuchtung oder photosensitive Folien; angegeben sind partielle Korrelationskoeffizienten nach Spearman (LED-Versuche im Gewächshaus) bzw. nach Pearson (LED-Versuche in der Klimakammer; Folien-Versuche in der Klimakammer und im Gewächshaus)..... cxl

Tabelle 12.20: Zusammenhang zwischen Lichteigenschaften und dem Trockenmassegehalt von *P. odorata*, kultiviert in der Klimakammer bzw. im Gewächshaus mit Lichtmodifikationen durch zusätzliche LED-Beleuchtung oder photosensitive Folien; angegeben sind partielle Korrelationskoeffizienten nach Spearman (LED-Versuche im Gewächshaus) bzw. nach Pearson (LED-Versuche in der Klimakammer; Folien-Versuche in der Klimakammer und im Gewächshaus) cxl

12. ANHANG

Anhang 1.: Chlorophyllfluoreszenzmessungen

Tabelle 12.1: Chlorophyllfluoreszenzmessungen bei Klimakammerversuchen („KK13“): angegeben ist das variable Fluoreszenzverhältnis Fv/Fm (Mittelwert und Standardabweichungen); Messgerät: Chlorophyll Fluorimeter PAM-2000 (Walz, Deutschland), n=40

Variante	HMG55%	PL4040%	FL+R	HMG72%	FL+G	PL57%	FL+B
	0,83 ±0,02	0,82 ±0,01	0,83 ±0,01	0,83 ±0,02	0,83 ±0,02	0,80 ±0,02	0,81 ±0,02
Kontrolle (FL)	0,83 ±0,02	0,83 ±0,01		0,83 ±0,02		0,80 ±0,02	

Tabelle 12.2: Chlorophyllfluoreszenzmessungen bei Gewächshausversuchen („GwH13“): angegeben ist das variable Fluoreszenzverhältnis Fv/Fm (Mittelwert und Standardabweichungen); Messgerät: Chlorophyll Fluorimeter PAM-2000 (Walz, Deutschland), n=40

NL	Variante (LEDs)	NL+B	NL+G	NL+R
0,81 ±0,02		0,81 ±0,02	0,81 ±0,02	0,81 ±0,02
	Variante (Folie)	NL+HMG	NL+PL	
		0,79 ±0,02	0,80 ±0,02	

Anhang 2.: Chlorophyll a und b Gehalte

Tabelle 12.3: Einfluss zusätzlicher LED-Beleuchtung (B=Blau, G=Grün, R=Rot) auf den Chlorophyll a- und b-gehalt, Chl a:b und Chl a+b/Car-Verhältnisse von *P. odorata* nach drei Wochen, kultiviert in der Klimakammer (Versuchsjahr 2013) unter kontrollierten Bedingungen; beschrieben werden die Gehalte in den LED-Varianten (FL+B, FL+G, FL+R) im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLb=Fluoreszenzlampe, Kontrolle der LED-Variante mit blauen LEDs; FLg=Fluoreszenzlampe, Kontrolle der LED-Variante mit grünen LEDs; FLr=Fluoreszenzlampe, Kontrolle der LED-Variante mit roten LEDs)

Lichtvariante*	CHL A		CHL B		CHLA:B		CHLA+B/CAR	
	[mg 100 g ⁻¹ FM]	% *	[mg 100 g ⁻¹ FM]	% *	[mg 100 g ⁻¹ FM]	% *	[mg 100 g ⁻¹ FM]	% *
FLb	33,40±1,10		5,92 b ±0,72		5,70 b ±0,63		0,71±0,05	
FL+B	34,67±1,72	+3,8	7,45 a ±1,04	+25,8	4,71 a ±0,54	-17,37	0,75±0,07	+5,63
FLg	31,28±0,59		6,50±0,34		4,71±0,18		0,64±0,04	
FL+G	33,35±2,21	+6,61	6,65±0,96	+2,31	5,06±0,56	+7,43	0,67±0,07	+4,69
FLr	28,65±1,72		5,26±0,46		5,47±0,47		0,64 b ±0,01	
FL+R	27,10±1,28	-5,42	5,79±0,75	+9,99	4,73±0,52	-13,53	0,70 a ±0,03	+9,38

*Veränderungen gegenüber Kontrolle

Angegeben sind Mittelwerte und Standardabweichungen; unterschiedliche Kleinbuchstaben bezeichnen signifikante Unterschiede zwischen LED-Variante und zugehöriger Kontrolle (Tukey-test, P≤0.05), n=4

Tabelle 12.4: Einfluss lichtmodifizierender Folien (HMG72%= „Half minus green“-Folie mit 72% Lichtdurchlässigkeit; PL57%= „Pale Lavander“-Folie mit 57% Lichtdurchlässigkeit; HMG55%= „Half minus green“-Folie mit 55% Lichtdurchlässigkeit; PL40%= „Pale Lavander“-Folie mit 40% Lichtdurchlässigkeit) auf den Chlorophyll a- und b-gehalt, Chl a:b und Chl a+b/Car-Verhältnisse von *P. odorata* nach drei Wochen, kultiviert in der Klimakammer (Versuchsjahr 2013) unter kontrollierten Bedingungen; beschrieben werden die Gehalte in den Folien-Varianten im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (FLh1=Fluoreszenzlampe, Kontrolle der Folien-Variante HMG72%; FLp1=Fluoreszenzlampe, Kontrolle der Folien-Variante PL57%; FLh2=Fluoreszenzlampe, Kontrolle der Folien-Variante HMG55%, FLp2=Fluoreszenzlampe, Kontrolle der Folien-Variante PL40%)

Lichtvariante*	CHL A [mg 100 g ⁻¹ % * FM]	CHL B [mg 100 g ⁻¹ % * FM]	CHLA:B [mg 100 g ⁻¹ % * FM]	CHLA+B/CAR [mg 100 g ⁻¹ % * FM]
FLh1	31,28±0,59	6,50±0,34	4,82±0,26	0,64±0,04
HMG72%	30,63±3,26 -2,09	6,09±0,85 -6,46	5,05±0,22 +4,77	0,62±0,04 -3,22
FLp1	33,40±1,10	5,92±0,72	5,70±0,63	0,71±0,05
PL57%	32,16±1,23 -3,72	6,57±0,81 +10,96	4,96±0,67 -12,98	0,69±0,06 -2,82
FLh2	38,81±1,26	7,69±1,08	5,12±0,66	0,84a±0,04
HMG55%	35,15±2,65 -9,44	6,24±0,16 -18,82	5,63±0,37 +9,96	0,76b±0,03 -9,52
FLp2	28,65±1,72	5,26b±0,46	5,47a±0,47	0,64a±0,01
PL40%	29,24±1,40 +2,06	6,54a±0,55 +24,25	4,49b±0,34 -17,02	0,57b±0,03 -10,94

*Veränderungen gegenüber Kontrolle

Angegeben sind Mittelwerte und Standardabweichungen; unterschiedliche Kleinbuchstaben bezeichnen signifikante Unterschiede zwischen LED-Variante und zugehöriger Kontrolle (Tukey-test, $P \leq 0.05$), $n=4$

Tabelle 12.5: Einfluss zusätzlicher LED-Beleuchtung (B=Blau, G=Grün, R=Rot) auf den Chlorophyll a-gehalt [mg 100 g⁻¹ FM] von *P. odorata* nach drei Wochen, kultiviert im Gewächshaus mit natürlichem Licht; beschrieben werden die Gehalte in den LED-Varianten (NL+B, NL+G, NL+R) im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (NL)

	CHLOROPHYLL A*							
	GwH13		GwH14		GwH14, nachts		GwH14, 24h	
	mg/ 100 g	[%]	mg/ 100 g	[%]	mg/ 100 g	[%]	mg/ 100 g	[%]
NL	23,41 ±0,50		15,09 ±1,36		12,72 ±0,76		13,08 ±0,69	
NL+B	24,15 ±1,22 +3,16		15,18 ±0,41 +0,60		13,79 ±1,03 +8,41		14,17 ±0,73 +8,33	
NL+G	22,58 ±1,40 -3,55		13,39 ±0,69 -11,27		13,23 ±1,48 +4,01		14,21 ±0,83 +8,64	
NL+R	22,96 ±0,42 -1,92		14,58 ±1,05 -3,38		14,20 ±0,46 +11,64		14,83 ±0,98 +13,38	

*Angegeben sind Mittelwerte und Standardabweichungen; kursiv geschrieben: prozentuale Veränderungen im Vergleich zur Kontrolle; unterschiedliche Buchstaben bezeichnen signifikante Unterschiede innerhalb einer Versuchsreihe zwischen Behandlungen, fehlende Buchstaben bedeuten keine signifikanten Unterschiede (Tukey-test, $P \leq 0.05$), $n=4$

Tabelle 12.6: Einfluss zusätzlicher LED-Beleuchtung (B=Blau, G=Grün, R=Rot) auf den Chlorophyll b-gehalt [mg 100 g⁻¹ FM] von *P. odorata* nach drei Wochen, kultiviert im Gewächshaus mit natürlichem Licht; beschrieben werden die Gehalte in den LED-Varianten (NL+B, NL+G, NL+R) im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (NL)

	CHLOROPHYLL B*							
	GwH13		GwH14		GwH14, nachts		GwH14, 24h	
	mg/ 100 g	[%]	mg/ 100 g	[%]	mg/ 100 g	[%]	mg/ 100 g	[%]
NL	4,09 ±0,73		3,05 ±1,52		3,28 ±1,70		0,69 ±0,60	
NL+B	5,62 ±1,23 +37,41		2,83 ±1,27 -7,21		3,23 ±1,33 -1,52		0,53 ±0,94 -23,19	
NL+G	3,34 ±1,42 -18,34		2,30 ±1,51 -24,59		2,24 ±1,98 -31,71		1,05 ±0,98 +52,17	
NL+R	4,52 ±0,93 +10,51		3,31 ±1,82 +8,52		3,75 ±1,72 +14,33		0,61 ±0,96 -11,59	

*Angegeben sind Mittelwerte und Standardabweichungen; kursiv geschrieben: prozentuale Veränderungen im Vergleich zur Kontrolle; unterschiedliche Buchstaben bezeichnen signifikante Unterschiede innerhalb einer Versuchsreihe zwischen Behandlungen, fehlende Buchstaben bedeuten keine signifikanten Unterschiede (Tukey-test, $P \leq 0.05$), $n=4$

Tabelle 12.7: Einfluss zusätzlicher LED-Beleuchtung (B=Blau, G=Grün, R=Rot) auf das Chlorophyll a:b-Verhältnis und Chlorophyll a+b/ Carotinoid-verhältnis von *P. odorata* nach drei Wochen, kultiviert im Gewächshaus mit natürlichen Licht; beschrieben werden die Gehalte in den LED-Varianten (NL+B, NL+G, NL+R) im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (NL)

	CHLA:B // CHLA+B/CAR*							
	GwH13		GwH14		GwH14, nachts		GwH14, 24h	
	Chl a:b	Chl a+b:Car	Chl a:b	Chl a+b:Car	Chl a:b	Chl a+b:Car	Chl a:b	Chl a+b:Car
<i>NL</i>	5,84±0,88	0,55±0,04	6,61±4,80	0,45±0,10	5,60±4,61	0,39±0,11	10,53±1,14	0,28±0,05
<i>NL+B</i>	4,45±0,97	0,64±0,07	6,59±3,94	0,38±0,06	4,89±1,69	0,37±0,07	8,40±0,77	0,27±0,03
<i>NL+G</i>	7,86±3,71	0,48±0,08	4,52±0,33	0,45±0,11	8,69±4,66	0,29±0,10	8,72±1,69	0,29±0,04
<i>NL+R</i>	5,12±1,05	0,59±0,06	5,52±4,19	0,52±0,19	3,78±1,28	0,44±0,18	10,87±2,90	0,29±0,05

*Angabe sind Mittelwerte und Standardabweichungen; kursiv geschrieben: prozentuale Veränderungen im Vergleich zur Kontrolle; unterschiedliche Buchstaben bezeichnen signifikante Unterschiede innerhalb einer Versuchsreihe zwischen Behandlungen, fehlende Buchstaben bedeuten keine signifikanten Unterschiede (Tukey-test, $P \leq 0.05$), $n=4$

Tabelle 12.8: Einfluss lichtmodifizierender Folien (HMG= „Half minus green“-Folie; PL= „Pale Lavender“-Folie) auf die Chlorophyll a- und b-gehalte [mg 100 g⁻¹ FM] von *P. odorata* nach drei Wochen, kultiviert im Gewächshaus mit natürlichen Licht; beschrieben werden die Gehalte in den LED-Varianten (NL+B, NL+G, NL+R) im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (NL)

	CHLOROPHYLL A*				CHLOROPHYLL B*			
	GwH13		GwH14		GwH13		GwH14	
	mg/ 100 g	[%]	mg/ 100 g	[%]	mg/ 100 g	[%]	mg/ 100 g	[%]
<i>NL</i>	23,41±0,50		15,09±1,36		4,09 ±0,73		3,05 ±1,52	
<i>NL-HMG</i>	20,42±1,31	-12,77	13,45±0,99	-10,87	3,91 ±0,60	-4,40	2,43 ±1,38	-20,33
<i>NL-PL</i>	22,80±1,31	-2,61	12,34±0,94	-18,22	5,19 ±1,21	+26,89	1,88 ±1,32	-38,36

*Angabe sind Mittelwerte und Standardabweichungen; kursiv geschrieben: prozentuale Veränderungen im Vergleich zur Kontrolle; unterschiedliche Buchstaben bezeichnen signifikante Unterschiede innerhalb einer Versuchsreihe zwischen Behandlungen, fehlende Buchstaben bedeuten keine signifikanten Unterschiede (Tukey-test, $P \leq 0.05$), $n=4$

Tabelle 12.9: Einfluss lichtmodifizierender Folien (HMG= „Half minus green“-Folie; PL= „Pale Lavender“-Folie) auf das Chlorophyll a:b-Verhältnis und Chlorophyll a+b: Carotinoidverhältnis von *P. odorata* nach drei Wochen, kultiviert im Gewächshaus mit natürlichen Licht; beschrieben werden die Gehalte in den LED-Varianten (NL+B, NL+G, NL+R) im Vergleich zur zugehörigen Kontrolle (NL)

	CHLA:B*		CHLA+B/CAR*	
	GwH13	GwH14	GwH13	GwH14
<i>NL</i>	5,84±0,88	0,55±0,04	6,61±4,80	0,45±0,10
<i>NL-HMG</i>	5,33±0,90	0,58±0,06	4,42±0,53	0,41±0,09
<i>NL-PL</i>	4,57±1,03	0,50±0,08	5,14±1,01	0,37±0,09

*Angabe sind Mittelwerte und Standardabweichungen; kursiv geschrieben: prozentuale Veränderungen im Vergleich zur Kontrolle; unterschiedliche Buchstaben bezeichnen signifikante Unterschiede innerhalb einer Versuchsreihe zwischen Behandlungen, fehlende Buchstaben bedeuten keine signifikanten Unterschiede (Tukey-test, $P \leq 0.05$), $n=4$

Tabelle 12.10: Zusammenhang zwischen Lichteigenschaften und Chl a:b und Chl a+b: Car-Verhältnissen in *P. odorata*, kultiviert im Gewächshaus (Versuchsreihe „GwH13“ und „GwH14“) mit und ohne photoselektive Folien; angegeben sind Partialkorrelationskoeffizienten nach Pearson

		TLS	Korrelationskoeffizienten										
			Spektralbereichsanteile						Verhältnisse				
			401-450	451-500	501-550	551-600	601-650	651-700	B:R	BR:G	B:G	R:G	R:FR
GwH13	Chl a:b	0,54	0,15	-0,29	-0,51	0,57	-0,48	0,30	-0,06	-0,10	-0,10	0,02	0,09
	Chl a+b/ Car	0,38	-0,07	0,44	0,59	-0,68	0,62	-0,44	-0,42	-0,38	-0,37	0,45	0,39
GwH14	Chl a:b	0,23	0,46	-0,51	0,22	0,03	0,18	0,35	0,27	0,24	0,29	0,46	-0,37
	Chl a+b/ Car	0,39	-0,67	0,09	-0,15	-0,02	-0,40	0,24	-0,06	0,01	-0,14	-0,52	0,12

Kursiv geschrieben: nicht signifikant ($P > 0,05$)

Anhang 3: Messungen UV-Strahlung

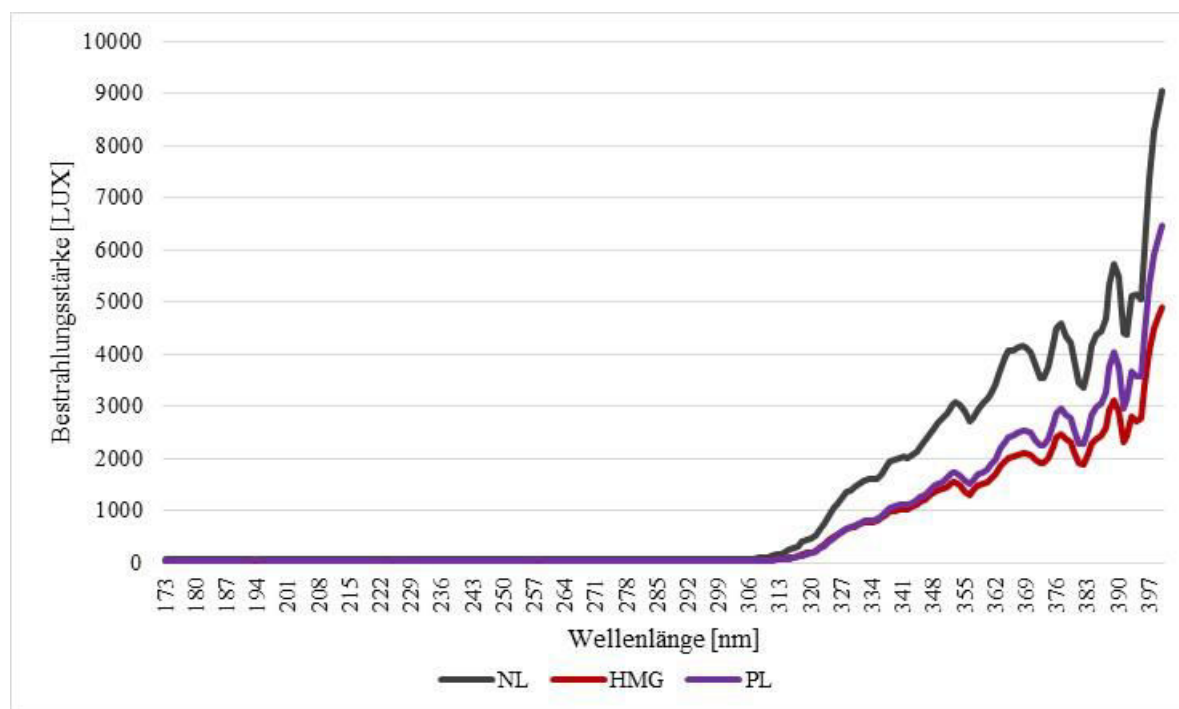


Abbildung 12.1: Lichtspektrum der Leuchtstoffröhren im UV-Bereich in der Klimakammer ohne und mit Folien; berechnet in Relation zur relativen Bestrahlungsenergie der Kontrolle (=FL ohne Folie); gemessen mit dem AvantesAvaSpec NIR 256 Spektrometer

Anhang 4: Verbrauch an Nährlösung

Tabelle 12.11: Einfluss einer zusätzlichen LED-Beleuchtung auf den Nährlösungsverbrauch (absolut und relativ, bezogen auf die zugehörige Kontrolle) von *P. odorata*, kultiviert in der Klimakammer; Versuchsreihe „KK13“

	FL+B		FL+G		FL+R	
	FL	FL+B	FL	FL+G	FL	FL+R
Absolut [l/ Topf]	7,1 _b ±0,18	9,5 _a ±0,00	10,19±0,92	12,00±1,90	10,83±0,78	10,71±1,16
Absolut [l/ Pflanze]	1,4	1,9	2,0	2,4	2,2	2,1
[ml/ g FM]	54,73±2,77	58,44±3,79	46,42±4,57	50,89±6,71	36,27±1,86	36,07±5,57
relativ [%]	100	125	100	114,83	100	113,15

Angegeben sind Mittelwerte und Standardabweichungen (in Klammern); kursiv geschrieben: prozentuale Unterschiede im Vergleich zur jeweiligen Kontrolle; unterschiedliche Kleinbuchstaben bezeichnen signifikante Unterschiede zwischen Behandlungen (Tukey-test, $P \leq 0.05$), $n=4$

Tabelle 12.12: Einfluss einer zusätzlichen LED-Beleuchtung auf den Nährlösungsverbrauch (absolut und relativ, bezogen auf die zugehörige Kontrolle) von *P. odorata* nach drei Wochen, kultiviert im Gewächshaus mit natürlichem Licht

		NL	NL+B	NL+G	NL+R
„GwH13“	absolut [l/ Topf]	12,25 _a ±0,94	12,05 _{ab} ±1,38	10,86 _{ab} ±0,68	10,82 _b ±0,54
	Absolut [l/ Pflanze]	2,5	2,4	2,2	2,2
	[ml/ g FM]	56,92±2,47	65,50±11,39	48,99±6,54	54,04±2,26
	relativ [%]	100	98,37	88,65	88,33
„GwH14“	absolut [l/ Topf]	9,25±0,51	9,51±0,21	9,01±0,35	9,18±0,57
	Absolut [l/ Pflanze]	3,1	3,2	3,0	3,1
	[ml/ g FM]	76,03±6,35	60,09±2,97	62,02±3,34	59,49±4,59
	relativ [%]	100	102,81	97,41	99,24
„GwH14, nachts“	absolut [l/ Topf]	3,41±0,23	3,67±0,20	3,45±0,16	3,64±0,13
	Absolut [l/ Pflanze]	1,1	1,2	1,2	1,2
	[ml/ g FM]	75,65±9,14	56,02±5,77	72,68±7,69	58,31±6,40
	relativ [%]	100	107,62	101,17	106,74
„GwH14, 24 h“	absolut [l/ Topf]	5,02 _b ±0,27	5,71 _a ±0,22	5,54 _a ±0,33	5,56 _a ±0,24
	Absolut [l/ Pflanze]	1,7	1,9	1,8	1,9
	[ml/ g FM]	77,56±6,82	55,20±2,88	58,61±3,55	56,44±3,12
	relativ [%]	100	113,75	110,36	110,76

Angegeben sind Mittelwerte und Standardabweichungen (in Klammern); kursiv geschrieben: prozentuale Unterschiede im Vergleich zur jeweiligen Kontrolle; unterschiedliche Kleinbuchstaben bezeichnen signifikante Unterschiede innerhalb einer Versuchsreihe zwischen Behandlungen (Tukey-test, $P \leq 0.05$), $n=6$

Tabelle 12.13: Einfluss photosелеktiver Folien auf den Nährlösungsverbrauch (absolut und relativ, bezogen auf die zugehörige Kontrolle) von *P. odorata*, kultiviert in der Klimakammer; Versuchsreihe „KK13“

	FL+HMG72%		FL+PL57%		FL+HMG55%		FL+PL40%	
	HMG72 %	FL	FL+PL5 7%	FL	FL+HM G55%	FL	FL+PL40 %	FL
Absolut [l/ Topf]	9,54 ±0,51	10,19 ±0,92	7,0 ±0,37	7,1 ±0,18	n.b.	n.b.	6,99 _b ±1,23	10,83 _a ±0,78
Absolut [l/ Pflanze]	1,9	2,0	1,4	1,4	n.b.	n.b.	1,4	2,2
[ml/ g FM]	42,06 ±1,96	46,42 ±4,57	67,06 ±0,58	54,73 ±2,77	n.b.	n.b.	54,92 ±7,84	36,27 ±1,86
%	94,66	100	98,96	100	n.b.	n.b.	60,89	100

Angegeben sind Mittelwerte und Standardabweichungen (in Klammern); kursiv geschrieben: prozentuale Unterschiede im Vergleich zur jeweiligen Kontrolle; unterschiedliche Kleinbuchstaben bezeichnen signifikante Unterschiede zwischen Behandlungen (Tukey-test, $P \leq 0.05$), $n=4$

Tabelle 12.14: Einfluss photosелеktiver Folien auf den Nährlösungsverbrauch (absolut und relativ, bezogen auf die zugehörige Kontrolle) von *P. odorata*, kultiviert im Gewächshaus mit natürlichem Licht

		NL	HMG	PL
„GwH13“	absolut [l/ Topf]	12,25 ^a ±0,94	8,88 ^c ±0,61	9,26 ^b ±0,97
	Absolut [l/ Pflanze]	2,5	1,8	1,9
	[ml/ g FM]	58,24±2,96	63,38±7,48	79,15±8,71
	relativ [%]	100	72,49	75,59
„GwH14“	absolut [l/ Topf]	9,25 ^a ±0,51	8,05 ^b ±0,23	7,68 ^b ±0,79
	Absolut [l/ Pflanze]	3,1	2,7	2,6
	[ml/ g FM]	76,03±6,35	68,64±4,59	68,49±10,73
	relativ [%]	100	87,03	83,03

Angegeben sind Mittelwerte und Standardabweichungen (in Klammern); kursiv geschrieben: prozentuale Unterschiede im Vergleich zur jeweiligen Kontrolle; unterschiedliche Kleinbuchstaben bezeichnen signifikante Unterschiede zwischen Behandlungen (Tukey-test, $P \leq 0.05$), $n=6$

Anhang 5: Korrelationen

Tabelle 12.15: Korrelationsmatrix für Zusammenhänge zwischen Wachstumsparametern für die Versuchsreihe „KK13“ (LEDs)

	TL	FM	BM	TM	TMP	BMFM
TL	1,00	0,59	0,45	-0,08	0,40	-0,43
FM		1,00	0,96	-0,14	0,92	-0,01
BM			1,00	-0,27	0,92	0,28
FMBM				1,00	0,14	-0,38
TMP					1,00	0,14
TM%						1,00

Fett geschrieben: signifikant (Tukey-test, $P \leq 0.05$), $n=24$

Tabelle 12.16: Korrelationsmatrix für Zusammenhänge zwischen Wachstumsparametern für die Versuchsreihe „KK13“ (Folien)

	TL	FM	BM	TM	TMP	BMFM
TL	1,00	0,11	0,10	-0,26	0,02	-0,02
FM		1,00	0,96	-0,04	0,93	-0,22
BM			1,00	-0,11	0,96	0,04
FMBM				1,00	0,16	-0,37
TMP					1,00	-0,03
TM%						1,00

Fett geschrieben: signifikant (Tukey-test, $P \leq 0.05$), $n=24$

Tabelle 12.17: Korrelationsmatrix für Zusammenhänge zwischen Wachstumsparametern für die Versuchsreihe „GwH13“ (LEDs)

	TL	FM	BM	TM	TMP	BMFM
TL	1,00	0,16	0,15	-0,32	-0,11	-0,03
FM		1,00	0,89	0,09	0,75	-0,43
BM			1,00	-0,03	0,75	0,01
FMBM				1,00	0,64	-0,26
TMP					1,00	-0,16
TM%						1,00

Fett geschrieben: signifikant (Tukey-test, $P \leq 0.05$), $n=24$

Tabelle 12.18: Korrelationsmatrix für Zusammenhänge zwischen Wachstumsparametern für die Versuchsreihe „GwH13“ (Folien)

	TL	FM	BM	TM	TMP	BMFM
TL	1,00	-0,75	-0,76	0,21	-0,74	-0,17
FM		1,00	0,97	0,06	0,97	0,01
BM			1,00	0,01	0,99	0,23
FMBM				1,00	0,14	-0,24
TMP					1,00	0,19
TM%						1,00

Fett geschrieben: signifikant (Tukey-test, $P \leq 0.05$), $n=24$

Tabelle 12.19: Korrelationsmatrix für Zusammenhänge zwischen Wachstumsparametern für die Versuchsreihe „GwH14“ (LEDs)

	TL	FM	BM	TM	TMP	BMFM
TL	1,00	0,53	0,38	-0,06	0,22	-0,46
FM		1,00	0,89	0,18	0,71	-0,53
BM			1,00	0,26	0,82	-0,09
FMBM				1,00	0,76	0,13
TMP					1,00	-0,01
TM%						1,00

Fett geschrieben: signifikant (Tukey-test, $P \leq 0.05$), $n=24$

Tabelle 12.20: Korrelationsmatrix für Zusammenhänge zwischen Wachstumsparametern für die Versuchsreihe „GwH14“ (Folien)

	TL	FM	BM	TM	TMP	BMFM
TL	1,00	-0,14	-0,40	0,36	-0,20	-0,47
FM		1,00	0,72	0,23	0,76	-0,03
BM			1,00	0,01	0,90	0,67
FMBM				1,00	0,45	-0,24
TMP					1,00	0,48
TM%						1,00

Fett geschrieben: signifikant (Tukey-test, $P \leq 0.05$), $n=24$

Tabelle 12.21: Korrelationsmatrix für Zusammenhänge zwischen Wachstumsparametern für die Versuchsreihe „GwH14, nachts“ (LEDs)

	TL	FM	BM	TM	TMP	BMFM
TL	1,00	0,34	0,20	0,15	0,21	-0,67
FM		1,00	0,98	0,07	0,97	-0,64
BM			1,00	0,01	0,99	-0,46
FMBM				1,00	0,15	-0,28
TMP					1,00	-0,49
TM%						1,00

Fett geschrieben: signifikant (Tukey-test, $P \leq 0.05$), $n=24$

Tabelle 12.22: Korrelationsmatrix für Zusammenhänge zwischen Wachstumsparametern für die Versuchsreihe „GwH14, 24h“ (LEDs)

	TL	FM	BM	TM	TMP	BMFM
TL	1,00	0,68	0,53	-0,29	0,16	-0,67
FM		1,00	0,92	-0,17	0,57	-0,70
BM			1,00	-0,25	0,57	-0,36
FMBM				1,00	0,65	-0,06
TMP					1,00	-0,33
TM%						1,00

Fett geschrieben: signifikant (Tukey-test, $P \leq 0.05$), $n=24$

Tabelle 12.23: Multiple Korrelationskoeffizienten (R^2) (TLS=Tageslichtsumme; TT=Tagestemperatur; NT=Nachttemperatur); berücksichtigt wurden jeweils die letzten drei Tage vor der Probenahme

Faktoren Inhaltsstoff	TLS, TT, NT	TLS, TT	TLS, NT	TT, NT	TLS
Ascorbinsäure	0,82	0,80	0,82	0,80	0,00
Carotinoide	0,48	0,03	0,02	0,10	0,00
Polyphenole	0,87	0,87	0,86	0,87	0,31
Antioxidative Kapazität	0,82	0,75	0,71	0,65	0,02
Flavonoide	0,75	0,75	0,74	0,75	0,28
Anthocyane	0,59	0,53	0,50	0,54	0,26

Fett geschrieben: signifikant (Tukey-test, $P \leq 0.05$), $n=24$

Tabelle 12.24: Multiple Korrelationskoeffizienten (R^2) (TLS=Tageslichtsumme; TT=Tagestemperatur; NT=Nachttemperatur; TLF= Tagesluftfeuchtigkeit; NLF=Nachtluftfeuchtigkeit); berücksichtigt wurde der gesamte Versuchszeitraum

Faktoren Parameter	TLS, TT, NT	TLS, TT	TLS, NT	TT, NT	TLS	TLS, TLF, NLF	TLF, NLF
Triebblänge	0,96	0,85	0,58	0,62	0,44	0,96	0,43
Frischmasse	0,97	0,87	0,80	0,93	0,74	0,97	0,89
Blattmasse	0,99	0,99	0,94	0,99	0,73	0,99	0,68
Blatt:Frischmasse	0,91	0,77	0,89	0,85	0,51	0,91	0,34
Trockenmasse	0,99	0,97	0,91	0,99	0,77	0,99	0,76
Trockenmasse%	0,86	0,58	0,75	0,26	0,41	0,86	0,55

Fett geschrieben: signifikant (Tukey-test, $P \leq 0.05$), $n=24$

Anhang 6: Partielle Korrelationen für Wachstumsparameter

Tabelle 12.25: Zusammenhang zwischen Lichteigenschaften und der Frischmasse von *P. odorata*, kultiviert in der Klimakammer bzw. im Gewächshaus mit Lichtmodifikationen durch zusätzliche LED-Beleuchtung oder photosensitive Folien; angegeben sind partielle Korrelationskoeffizienten nach Spearman (LED-Versuche im Gewächshaus) bzw. nach Pearson (LED-Versuche in der Klimakammer; Folien-Versuche in der Klimakammer und im Gewächshaus)

		Korrelationskoeffizienten											
		TLS	Spektralbereichsanteile						Verhältnisse				
			401-450	451-500	501-550	551-600	601-650	651-700	B:R	BR:G	B:G	R:G	R:FR
LED	KK13	0,91	0,11	0,14	0,03	-0,18	-0,10	-0,18	0,13	0,10	0,14	-0,01	
	GwH13	-0,14	0,52	0,15	-0,56	-0,13	-0,22	-0,13	0,15	0,59	0,69	0,37	
	GwH14	0,81	-0,04	0,20	-0,48	-0,71	-0,11	-0,71	0,53	-0,25	0,21	-0,39	
	GwH14, nachts	0,72	0,17	0,13	-0,44	-0,60	-0,42	-0,60	0,13	0,07	0,18	-0,20	
	GwH14, 24h	0,79	0,43	0,53	0,08	-0,15	-0,62	-0,15	0,53	-0,21	0,20	-0,40	
Folie	KK13	0,87	-0,35	-0,34	-0,35	0,58	0,67	-0,30	-0,76	0,53	-0,28	0,10	0,39
	GwH13	0,92	-0,86	-0,60	0,90	-0,30	-0,88	0,76	0,66	0,66	0,67	-0,64	-0,60
	GwH14	0,04	0,43	-0,21	-0,43	-0,02	0,30	0,07	0,36	0,43	0,26	-0,61	-0,34
	Ø	0,72	0,00	-0,00	-0,11	-0,21	-0,23	-0,16	0,22	0,27	0,30	-0,25	-0,21

Fett geschrieben: signifikant ($P \leq 0.05$)

Tabelle 12.26: Zusammenhang zwischen Lichteigenschaften und der Blattmasse von *P. odorata*, kultiviert in der Klimakammer bzw. im Gewächshaus mit Lichtmodifikationen durch zusätzliche LED-Beleuchtung oder photosensitive Folien; angegeben sind partielle Korrelationskoeffizienten nach Spearman (LED-Versuche im Gewächshaus) bzw. nach Pearson (LED-Versuche in der Klimakammer; Folien-Versuche in der Klimakammer und im Gewächshaus)

		Korrelationskoeffizienten											
		TLS	Spektralbereichsanteile						Verhältnisse				
			401-450	451-500	501-550	551-600	601-650	651-700	B:R	BR:G	B:G	R:G	R:FR
LED	KK13	0,83	0,10	0,23	0,20	-0,01	-0,39	-0,01	0,19	-0,12	0,04	-0,36	k.A.
	GwH13	-0,13	0,54	0,20	-0,55	0,17	0,28	0,17	0,20	0,54	0,69	0,31	k.A.
	GwH14	0,81	0,07	0,17	-0,58	-0,67	-0,02	-0,67	0,47	0,17	0,57	-0,01	k.A.
	GwH14, nachts	0,59	0,16	0,05	-0,52	-0,58	-0,33	-0,58	0,05	0,18	0,22	-0,09	k.A.
	GwH14, 24h	0,82	0,26	0,30	-0,18	-0,38	-0,49	-0,38	0,30	-0,09	0,12	-0,25	k.A.
Folie	KK13	0,85	-0,28	-0,27	-0,26	0,45	0,49	-0,24	-0,57	0,39	-0,22	0,07	0,30
	GwH13	0,94	-0,13	-0,03	0,28	-0,44	-0,09	0,33	0,77	0,78	0,79	-0,76	-0,75
	GwH14	0,60	0,33	-0,31	-0,36	0,28	0,15	0,36	0,61	0,63	0,52	-0,50	-0,62
Ø		0,74	0,14	0,04	-0,27	-0,22	-0,13	-0,19	0,34	0,35	0,39	-0,24	-0,43

Fett geschrieben: signifikant ($P \leq 0.05$)

Tabelle 12.27: Zusammenhang zwischen Lichteigenschaften und Blatt:Frishmasse-Verhältnis von *P. odorata*, kultiviert in der Klimakammer bzw. im Gewächshaus mit Lichtmodifikationen durch zusätzliche LED-Beleuchtung oder photosensitive Folien; angegeben sind partielle Korrelationskoeffizienten nach Spearman (LED-Versuche im Gewächshaus) bzw. nach Pearson (LED-Versuche in der Klimakammer; Folien-Versuche in der Klimakammer und im Gewächshaus)

		Korrelationskoeffizienten											
		TLS	Spektralbereichsanteile						Verhältnisse				
			401-450	451-500	501-550	551-600	601-650	651-700	B:R	BR:G	B:G	R:G	R:FR
LED	KK13	-0,54	-0,21	-0,04	0,36	0,33	-0,29	0,39	-0,10	-0,42	-0,29	-0,48	
	GwH13	-0,06	-0,22	-0,01	0,23	0,2	-0,02	0,28	-0,01	-0,17	-0,38	-0,23	
	GwH14	-0,25	0,02	-0,40	-0,75	0,13	0,40	-0,04	-0,39	0,73	0,36	0,65	
	GwH14, nachts	-0,58	-0,13	-0,38	-0,46	0,31	0,37	0,18	-0,38	0,50	0,04	0,56	
	GwH14, 24h	-0,47	-0,02	-0,40	-0,66	0,07	0,39	0,01	-0,40	0,70	0,37	0,72	
Folie	KK13	-0,11	0,24	0,24	0,04	-0,31	-0,23	0,24	0,36	-0,14	0,22	0,07	-0,26
	GwH13	-0,04	-0,01	-0,01	0,00	0,02	0,01	-0,01	-0,01	-0,04	-0,02	-0,01	-0,07
	GwH14	0,78	0,41	0,41	0,41	-0,28	-0,40	0,42	0,41	0,41	0,41	-0,40	-0,48
Ø		-0,15	0,01	-0,08	-0,15	0,06	0,03	0,19	-0,07	0,24	0,09	0,15	-0,28

Fett geschrieben: signifikant ($P \leq 0.05$)

Tabelle 12.28: Zusammenhang zwischen Lichteigenschaften und der Trockenmasse von *P. odorata*, kultiviert in der Klimakammer bzw. im Gewächshaus mit Lichtmodifikationen durch zusätzliche LED-Beleuchtung oder photoselektive Folien; angegeben sind partielle Korrelationskoeffizienten nach Spearman (LED-Versuche im Gewächshaus) bzw. nach Pearson (LED-Versuche in der Klimakammer; Folien-Versuche in der Klimakammer und im Gewächshaus)

		Korrelationskoeffizienten											
		TLS	Korrelationen mit Spektralbereichsan- teilen						Korrelation mit Verhältnissen				
			401- 450	451- 500	501- 550	551- 600	601- 650	651- 700	B:R	BR:G	B:G	R:G	R:FR
LED	KK13	0,81	-0,01	0,09	0,19	-0,4	0,12	-0,38	0,01	0,2	0,17	0,18	
	GwH13	-0,79	0,29	0,27	-0,61	-0,40	-0,26	-0,28	0,27	0,55	0,43	0,09	
	GwH14	0,04	0,54	0,91	0,34	-0,15	-0,91	-0,03	0,91	-0,38	0,19	-0,71	
	GwH14, nachts	0,28	0,77	0,47	-0,35	-0,04	-0,50	0,05	0,47	0,35	0,68	0,21	
	GwH14, 24h	0,53	0,42	0,44	0,03	-0,02	-0,50	0,06	0,44	-0,01	0,21	-0,32	
Folie	KK13	0,92	-0,31	-0,24	-0,42	0,53	0,69	-0,22	-0,72	0,57	-0,22	0,16	0,32
	GwH13	0,88	0,74	0,74	0,74	-0,76	-0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	-0,74	-0,70
	GwH14	0,25	0,36	0,35	0,30	-0,46	-0,36	0,33	0,36	0,31	0,35	-0,4	-0,33
Ø		0,48	0,39	0,46	0,04	-0,24	-0,38	0,06	0,38	0,32	0,35	-0,25	-0,29

Fett geschrieben: signifikant ($P \leq 0.05$)

Tabelle 12.29: Zusammenhang zwischen Lichteigenschaften und dem Trockenmassegehalt von *P. odorata*, kultiviert in der Klimakammer bzw. im Gewächshaus mit Lichtmodifikationen durch zusätzliche LED-Beleuchtung oder photoselektive Folien; angegeben sind partielle Korrelationskoeffizienten nach Spearman (LED-Versuche im Gewächshaus) bzw. nach Pearson (LED-Versuche in der Klimakammer; Folien-Versuche in der Klimakammer und im Gewächshaus)

		Korrelationskoeffizienten											
		TLS	Spektralbereichsanteile						Verhältnisse				
			401- 450	451- 500	501- 550	551- 600	601- 650	651- 700	B:R	BR:G	B:G	R:G	R:FR
LED	KK13	-0,16	-0,02	-0,04	0,09	-0,46	0,27	-0,46	-0,04	0,29	0,19	0,36	
	GwH13	-0,93	0,24	0,16	0,07	0,24	-0,05	0,24	0,16	0,11	0,24	0,08	
	GwH14	-0,24	0,85	0,64	0,20	0,41	-0,48	0,41	0,63	0,29	0,79	0,15	
	GwH14, nachts	0,04	0,33	0,63	0,38	-0,08	-0,69	-0,08	0,63	-0,54	-0,01	-0,64	
	GwH14, 24h	-0,27	0,22	0,27	0,19	0,18	-0,19	0,18	0,27	-0,09	0,19	-0,15	
Folie	KK13	0,10	-0,15	-0,12	0,31	0,02	-0,31	-0,15	0,10	-0,32	-0,17	-0,28	0,13
	GwH13	-0,15	0,36	-0,83	0,60	0,23	-0,35	0,72	0,74	0,75	0,72	-0,73	-0,75
	GwH14	-0,14	-0,16	-0,24	-0,00	-0,35	-0,28	0,31	0,19	0,28	0,19	-0,21	-0,16
Ø		-0,30	0,26	0,05	0,24	0,02	-0,28	0,17	0,37	0,12	0,32	-0,20	-0,32

Fett geschrieben: signifikant ($P \leq 0.05$)

Anhang 7: Hauptkomponentenanalysen

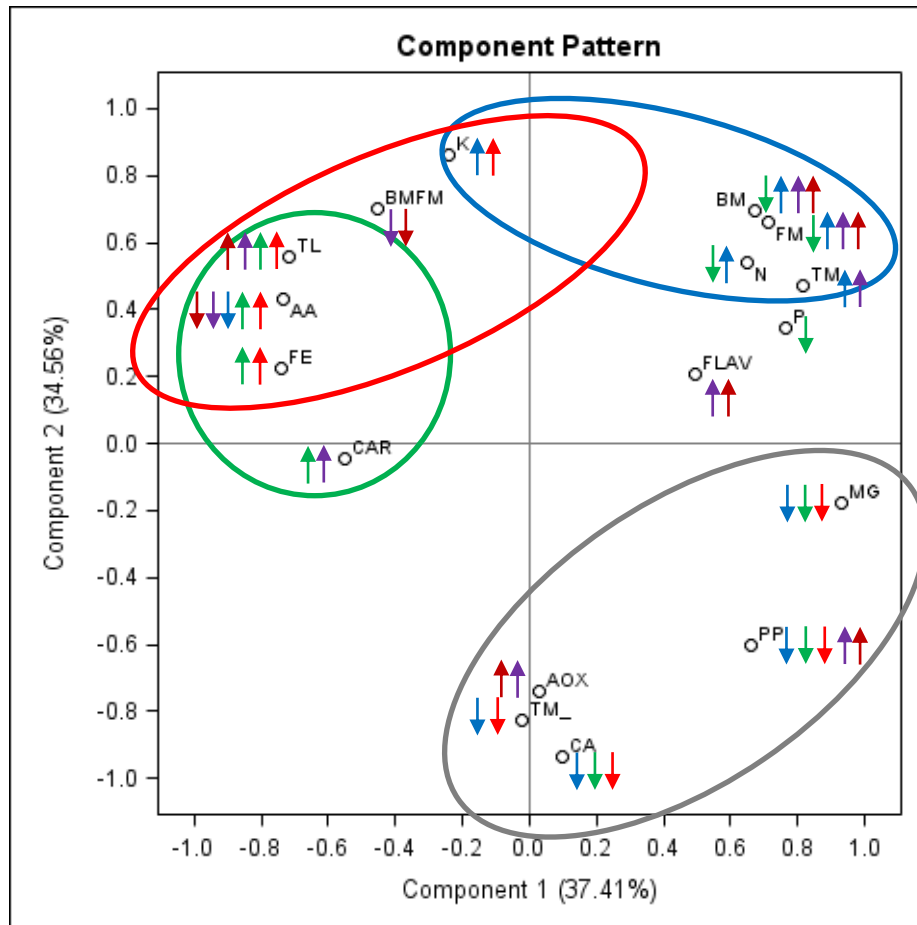


Abbildung 12.2: Hauptkomponentenanalyse mit den Ergebnissen aus der Versuchsreihe „GwH13“: TL (=Triebblänge), FM (=Frischmasse), BM (=Blattmasse), TM (=Trockenmasse), TM₋ (=Trockenmassegehalt), BMFM (=Blatt:Frischmasse), AA (=Ascorbinsäure), CAR (=Carotinoide), PP (=Polyphenole), FLAV (=Flavonoide), CA (=Calcium), FE (=Eisen), K (=Kalium), MG (=Magnesium), P (=Phosphor), N (=Nitrat); Pfeile deuten die Beeinflussung der einzelnen Untersuchungsparameter durch die spektrale Lichtzusammensetzung an: blau (blaue LEDs/ kurz- & langwelliger Blaulichtanteil); grün (grüne LEDs/ kurz- & langwelliger Grünlichtanteil); rot (rote LEDs/ kurz- & langwelliger Rotlichtanteil); ↑ Beeinflussung durch HMG; ↑ Beeinflussung durch PL

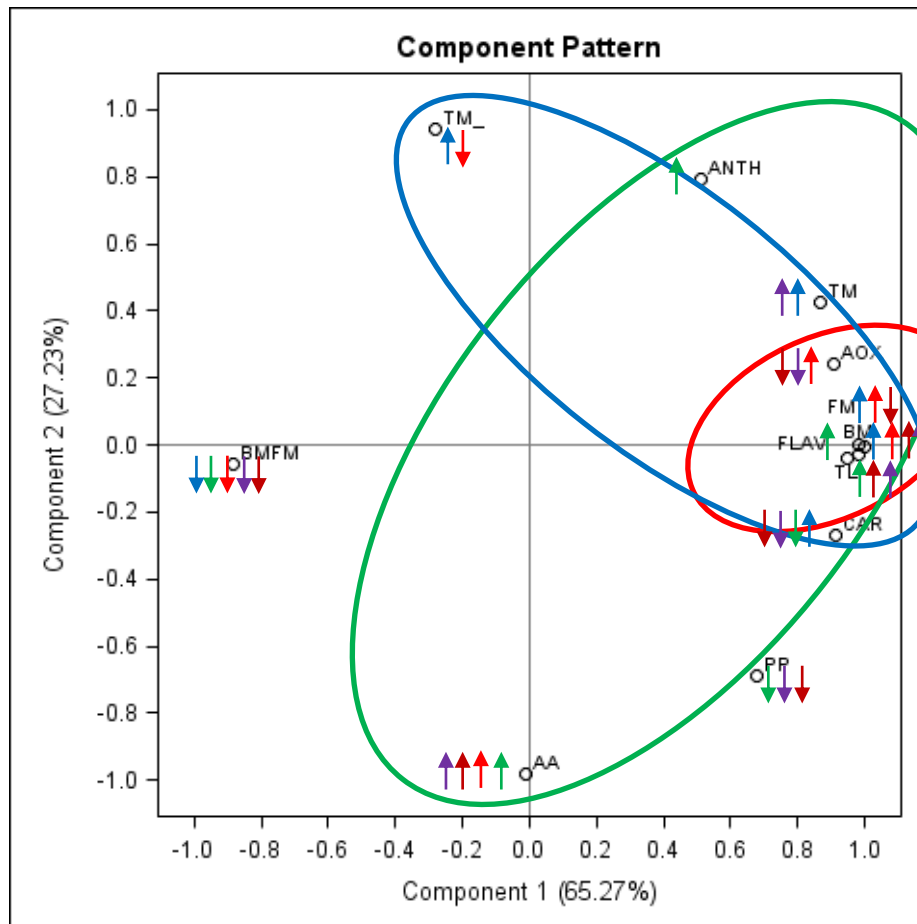


Abbildung 12.3: Hauptkomponentenanalyse mit den Ergebnissen aus der Versuchsreihe „GwH14“: TL (=Trieblänge), FM (=Frischmasse), BM (=Blattmasse), TM (=Trockenmasse), TM_ (=Trockenmassegehalt), BFM (=Blatt:Frischmasse), AA (=Ascorbinsäure), CAR (=Carotinoide), PP (=Polyphenole), FLAV (=Flavonoide), ANTH (=Anthocyane); Pfeile deuten die Beeinflussung der einzelnen Untersuchungsparameter durch die spektrale Lichtzusammensetzung an: blau (blaue LEDs/ kurz- & langwelliger Blaulichtanteil); grün (grüne LEDs/ kurz- & langwelliger Grünlichtanteil); rot (rote LEDs/ kurz- & langwelliger Rotlichtanteil); ↑ Beeinflussung durch HMG; ↓ Beeinflussung durch PL

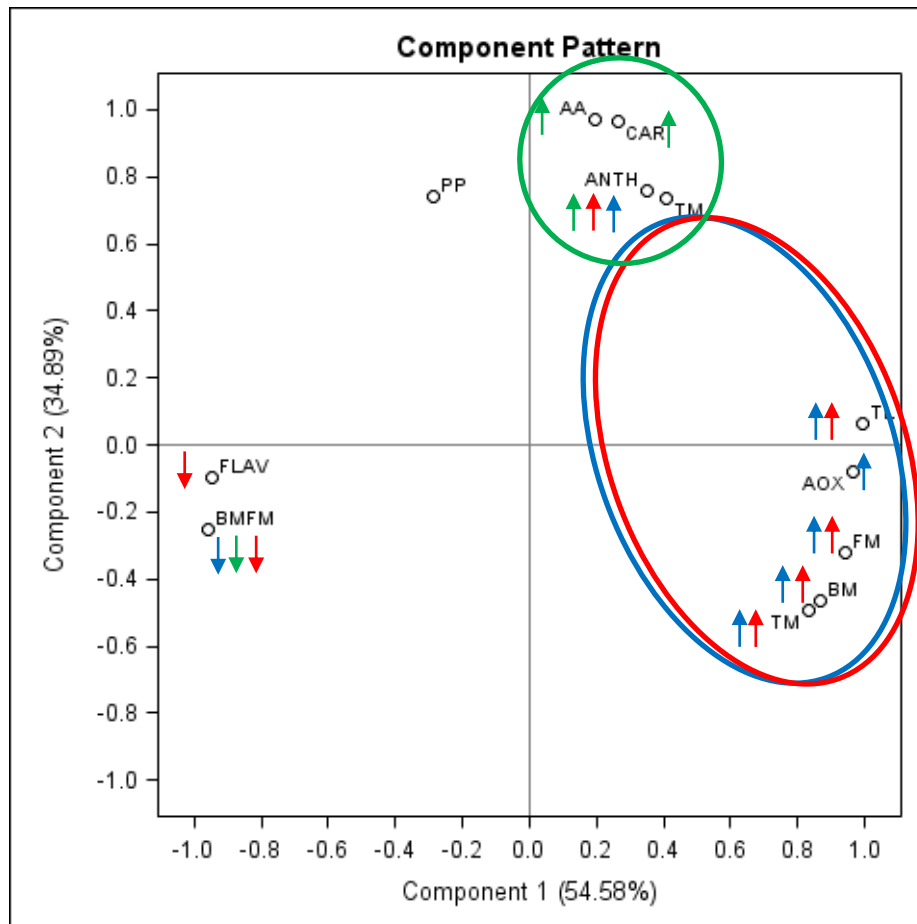


Abbildung 12.4: Hauptkomponentenanalyse mit den Ergebnissen aus der Versuchsreihe „GwH14, nachts“: TL (=Trieblänge), FM (=Frischmasse), BM (=Blattmasse), TM (=Trockenmasse), TM_ (=Trockenmassegehalt), BFM (=Blatt:Frischmasse), AA (=Ascorbinsäure), CAR (=Carotinoide), PP (=Polyphenole), FLAV (=Flavonoide), ANTH (=Anthocyane); Pfeile deuten die Beeinflussung der einzelnen Untersuchungsparameter durch die spektrale Lichtzusammensetzung an: blau (blaue LEDs/ kurz- & langwelliger Blaulichtanteil); grün (grüne LEDs/ kurz- & langwelliger Grünlichtanteil); rot (rote LEDs/ kurz- & langwelliger Rotlichtanteil)

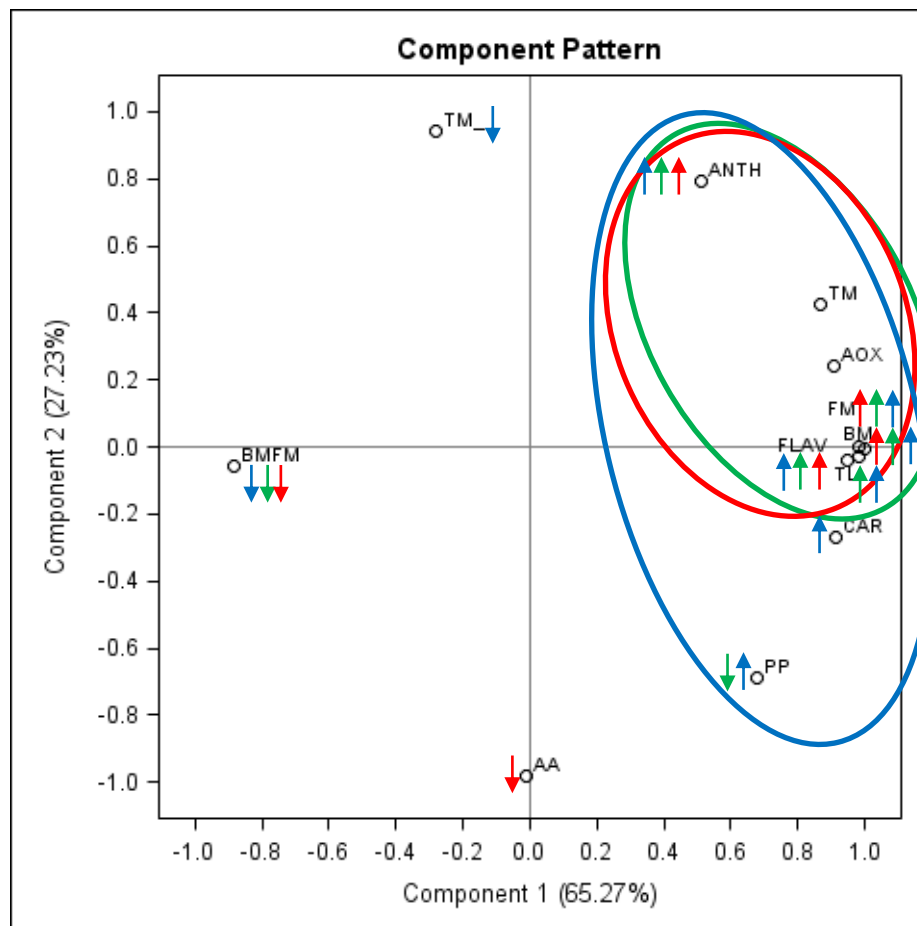


Abbildung 12.5: Hauptkomponentenanalyse mit den Ergebnissen aus der Versuchsreihe „GwH14, 24h“: TL (=Trieblänge), FM (=Frischmasse), BM (=Blattmasse), TM (=Trockenmasse), TM_ (=Trockenmassegehalt), BMFM (=Blatt:Frischmasse), AA (=Ascorbinsäure), CAR (=Carotinoide), PP (=Polyphenole), FLAV (=Flavonoide), ANTH (=Anthocyane); Pfeile deuten die Beeinflussung der einzelnen Untersuchungsparameter durch die spektrale Lichtzusammensetzung an: blau (blaue LEDs/ kurz-& langwelliger Blaulichtanteil); grün (grüne LEDs/ kurz-& langwelliger Grünlichtanteil); rot (rote LEDs/ kurz-& langwelliger Rotlichtanteil)

Anhang 8: Erreichte Nährwertveränderungen durch Lichtmodifikationen

Tabelle 12.30: Mittlere Inhaltsstoffgehalte in den Kontrollen (Klimakammer oder Gewächshaus), erforderliche Verzehrsmengen zur Erfüllung von Aufnahmeempfehlungen und höchste erreichte Steigerung des Gehaltes durch die vorgenommenen Lichtmodifikationen [%]; für das Gewächshaus wurde diesbezüglich jeweils der Mittelwert der Gehaltssteigerungen durch die LEDs bzw. Folien verglichen

Inhaltsstoff	Klimakammer			Gewächshaus		
	Kontrollbedingungen		Steigerung durch Lichtmodifikation* [%]	Kontrollbedingungen		Steigerung durch Lichtmodifikation* [%]
	Ø Gehalt [mg 100 g ⁻¹ FM]	Verzehrsmenge zur Erfüllung der Aufnahmeempfehlung [g]		Ø Gehalt [mg 100 g ⁻¹ FM]	Verzehrsmenge zur Erfüllung der Aufnahmeempfehlung [g]	
Ascorbinsäure	98,83	96 // 111**	+22,4 (PL57%)	165,04	58// 67**	+27 (NL+G)
Carotinoide	55,99	80***	+18,2 (PL40%)	46,43	97***	+8 (NL+B)
Polyphe-nole	1070,68	75****	+25,9 (FL+R)	715,02	89****	./.
Flavonoide	895,62	89 g*****	./.	474,95	168*****	./.
Anthocyane	./.	./.	./.	14,73	874*****	+113 (NL+G)
Calcium	310*****	307// 323**	+23,9 (PL40%)	350*****	271// 285**	+4,5 (HMG)
Eisen	2*****	550**	+22,1 (PL40%)	2*****	550**	+30,8 (NL+R)
Kalium	500*****	700**	+6,6 (PL40%)	520*****	673**	+9,4 (NL+R)
Magnesium	100*****	300// 350**	+11,3 (FL+G)	100*****	300//350**	./.
Phosphor	100*****	550**	+3,9 (PL40%)	100*****	550**	./.

*Durchschnittliche Steigerung unter Berücksichtigung aller Versuchsreihen

**Auf Grundlage der Aufnahmeempfehlung der EFSA (w // m)

***Erforderliche Aufnahmemenge, um bei einem Konversionsfaktor von 12 mg \pm 1 mg RE einzig mit Carotinoiden den Vitamin A-Bedarf zu erfüllen; angenommene β -Carotin-Konzentration in *P. odorata*: 26,6% nach (CZECZUGA, 1987)

**** Auf Grundlage der angenommenen Menge bei Einhaltung der "five-a-day"-Regel nach (WILLIAMSON AND HOLST, 2008)

***** Berechnet für durchschnittliche Trockenmassegehalte von 12,81% (Klimakammer) bzw. 13,41% (Gewächshaus)